

**MODELO PARA SISTEMA REACTIVO DE ALERTAS TEMPRANAS PARA CORRIENTES
SÚBITAS EN ZONAS URBANAS**

**Tesis para optar por el título de:
Magister en Ingeniería Civil**

**Preparado por:
Ing. Leandro Mario Ávila Rangel**

**Director de tesis:
Humberto Ávila Rangel, PhD.**



Barranquilla, Colombia, 2015

Contenido

1	Introducción	7
2	Objetivos.....	9
2.1	Objetivo general	9
2.2	Objetivos específicos.....	9
3	Justificación	10
4	Estado del arte	12
5	Zona de estudio.....	27
6	Metodología.....	30
7	Recorrido de Campo	32
7.1	Recorrido de campo Torcoroma.....	33
7.2	Recorrido de campo Felicidad.....	35
8	Geomorfologías de cuencas	37
8.1	Área y Perímetro de la Cuenca	37
8.2	Longitud del cauce principal y ancho	37
8.3	Coeficiente de forma	38
8.4	Coeficiente de Gravelius	38
9	Estimación de variables hidrológicas	39
9.1	Definición de subcuencas	39
9.1.1	Subcuencas Torcoroma	40
9.1.2	Subcuencas Felicidad	41
9.2	Pendiente de subcuencas	42
9.2.1	Pendientes cuenca Torcoroma	43
9.2.2	Pendientes cuenca Felicidad	44
9.3	Definición áreas permeables.....	45
9.3.1	Zonas permeables cuenca Torcoroma.....	47
9.3.2	Zonas permeables cuenca Felicidad.....	50
9.4	Red de monitoreo "Pluvial".....	52
10	Topografía de cauces.....	57
10.1	Cauce cuenca Torcoroma	¡Error! Marcador no definido.
10.2	Cauce cuenca Felicidad	¡Error! Marcador no definido.
11	Montaje de Modelo.....	57
11.1	Modelo Torcoroma	58
11.2	Modelo Felicidad	58
12	Calibración cuenca Torcoroma	60
13	Tiempo de concentración	66

13.1	Tiempo de concentración cuenca Torcoroma.....	67
13.2	Tiempo de concentración cuenca Torcoroma.....	68
13.3	Ajuste por regresión tiempo de concentración.....	69
14	Calibración cuenca Felicidad	71
15	Tormenta para evaluación de peligrosidad	74
16	Análisis de peligrosidad.....	80
17	Resultados.....	82
18	Análisis de Resultados	94
19	Conclusiones.....	95
20	Bibliografía.....	98

INDICE DE FIGURAS

Figura 3-1 . Vehículo arrastrado por arroyo en Barranquilla. (Joanpa, 2013)	10
Figura 4-1. Urbanización en países de América Latina. (Tucci, 2007)	12
Figura 4-2. Relación entre impermeabilización y aumento del escurrimiento superficial. (Bertoni, 2008)	14
Figura 4-3. Impacto hidrológico de la urbanización: variaciones en el hidrograma. (Bertoni, 2008)	15
Figura 4-5 .v Probabilidad de no excedencia anual de precipitación máxima en 24 horas - Estación Aeropuerto Ernesto Cortissoz	16
Figura 4-6. Arroyo Barranquilla Calle 76- Septiembre 2010 Rafael Vega.	18
Figura 4-7. Distribución de muertes por arroyos en Barranquilla. Fuente: www.arroyosdebarranquilla.co	19
Figura 4-8. Gráfico para la obtención de niveles de severidad en inundación pluvial. (Escuder, 2010)	21
Figura 4-9. Modelo de inundación pluvial y valoración de peligrosidad. (Smith G P, 2012).....	22
Figura 4-10. Modelos de inestabilidad de personas y vehículos (Shand, 2011)	23
Figura 4-11. Tiempos característicos en un hidrograma para la estimación del tiempo de concentración. (Jorge Julián Vélez Upegui, 2010).....	26
Figura 5-1. Cuenca Oriental y Occidental en la ciudad de Barranquilla (a), Subcuencas urbanas Barranquilla vertiente oriental (b)	27
Figura 7-1. Direcciones de flujo cuenca Torcoroma	33
Figura 7-2. Direcciones de flujo cuenca Felicidad	35
Figura 8-1. Longitud y perímetro de una cuenca	38
Figura 9-1. Subcuencas Torcoroma.....	40
Figura 9-2. Subcuencas Felicidad.....	41
Figura 9-3. Modelo de elevación digital Barranquilla	42
Figura 9-4. DEM cuenca Torcoroma	43
Figura 9-5. DEM cuenca Felicidad	44
Figura 9-6. Imagen satelital con cobertura vegetal de Barranquilla.....	45
Figura 9-7. Comparación de porcentajes permeables en imágenes satelitales y revisión en campo. (Díaz, 2014)	46
Figura 9-8. Área proyectada de zonas permeables y áreas efectivas. (Díaz, 2014)	47
Figura 9-9.Áreas permeables proyectadas cuenca Torcoroma.....	48
Figura 9-10. Áreas permeables proyectadas cuenca Felicidad	50
Figura 9-11. Red de monitoreo Pluvial.....	52
Figura 9-12. Pluviómetros red de monitoreo Pluvial	53
Figura 9-13. Polígonos de Thiessen para pluviómetros red de monitoreo Pluvial	54
Figura 9-14. Polígonos de Thiessen cuenca Felicidad	55
Figura 10-1. Levantamiento topográfico cauce Torcoroma	¡Error! Marcador no definido.
Figura 10-2. Perfil topográfico cauce Torcoroma.....	¡Error! Marcador no definido.
Figura 10-3. Levantamiento topográfico cauce Felicidad	¡Error! Marcador no definido.
Figura 10-4. Perfil topográfico cauce Felicidad.....	¡Error! Marcador no definido.
Figura 11-1. Modelo cuenca Torcoroma. PCSWMM	58
Figura 11-2. Modelo cuenca Felicidad. PCSWMM	58
Figura 12-1. Ubicación de equipos para calibración	61
Figura 12-2. Hietogramas registrados para calibración de modelo	62
Figura 12-3. Hidrogramas calibrados cuenca Torcoroma.....	66

Figura 13-1. Tiempos característicos en un hidrograma para la estimación del tiempo de concentración. (Jorge Julián Vélez Upegui, 2010).....	67
Figura 13-2. Hidrograma de salida cuenca Torcoroma. 28 Agosto 2014	67
Figura 13-3. Resultados de residuos regresión lineal tiempo de concentración Torcoroma.....	70
Figura 14-1. Subcuencas Felicidad.....	73
Figura 15-1. Hietograma lluvia 23 de agosto de 2014. Pluviómetro Bomberos	75
Figura 15-2. Hietograma lluvia 23 de agosto de 2014. Pluviómetro Delicias	75
Figura 15-3. Hietograma lluvia 23 de agosto de 2014. Pluviómetro Chiquinquirá.....	76
Figura 15-4. Curva IDF estación Aeropuerto Ernesto Cortissoz. Fuente IDEAM.....	77
Figura 15-5. Curva de probabilidad de no excedencia de precipitación máxima diaria	77
Figura 15-6. Distribución temporal y espacial tormenta 23 de Agosto en cuenca Felicidad	78
Figura 15-7. Ubicación subcuencas Felicidad	79
Figura 17-1. Hidrogramas generado durante el primer pulso de lluvia.....	82
Figura 17-2. Hidrograma generado para todo el evento de lluvia.....	83
Figura 17-3. Hidrogramas Elemento 1: Carrera 27 - Calle 71	83
Figura 17-4. Sistema de alerta temprana. Elemento 1. Hora: 1:15	84
Figura 17-5. Sistema de alerta temprana. Elemento 1. Hora: 1:45	85
Figura 17-6. Sistema de alerta temprana. Elemento 1. Hora: 1:51	85
Figura 17-7. Hidrogramas Elemento 43: Carrera 43- Calle 50	86
Figura 17-8. Sistema de alerta temprana. Elemento 43. Hora: 1:32	87
Figura 17-9. Sistema de alerta temprana. Elemento 43. Hora: 1:56	87
Figura 17-10. Sistema de alerta temprana. Elemento 43. Hora: 3:21	87
Figura 17-11. Hidrogramas Elemento 55: Carrera 54 – Vía 40 (Descarga Arroyo Felicidad)	88
Figura 17-12. Peligrosidad en arroyo Felicidad a los 5 minutos de lluvia.....	90
Figura 17-13. Peligrosidad en arroyo Felicidad a los 10 minutos de lluvia.....	91
Figura 17-14. Peligrosidad en arroyo Felicidad en 15 minutos de lluvia	92
Figura 17-15. Peligrosidad en arroyo Felicidad a los 30 minutos de lluvia.....	93

INDICE DE TABLAS

Tabla 4-1. Caudales pico en puntos de concentración estimados para distintos periodos de retorno	16
Tabla 4-2. Velocidades estimadas para caudales picos en punto de concentración	17
Tabla 4-3. Niveles de severidad en inundación pluvial.....	20
Tabla 4-4. Cuantificación de peligrosidad bajo condiciones de flujo. (Cox, 2010)	23
Tabla 4-5. Métodos comúnmente usados para la estimación del tiempo de concentración en minutos. (Durrans, 2007).....	25
Tabla 8-1. Área y Perímetro de cuencas	37
Tabla 8-2. Longitud y ancho de cuencas	38
Tabla 8-3. Coeficiente de Forma (Kf).....	38
Tabla 8-4. Coeficiente de Gravelius de cada cuenca	39
Tabla 9-1. Características subcuencas Torcoroma	40
Tabla 9-2. Características subcuencas Felicidad	41
Tabla 9-3. Pendientes subcuencas Torcoroma	43
Tabla 9-4. Pendiente subcuencas Felicidad	44
Tabla 9-5. Estimación de áreas permeables proyectadas. (Diaz, 2014)	47
Tabla 9-7. Porcentajes permeables e impermeables efectivos cuenca Torcoroma	49
Tabla 9-8. Porcentajes permeables e impermeables proyectadas cuenca Felicidad.....	51
Tabla 9-9. Porcentajes permeables e impermeables efectivos cuenca Felicidad	51

Tabla 9-10. Porcentaje de área de polígonos de Thiessen en subcuencas Felicidad	56
Tabla 10-1. Información topográfica cauce Torocroma	57
Tabla 10-2. Información topográfica cauce Felicidad	57
Tabla 11-1. Identificación de calles en modelo cuenca Felicidad.....	59
Tabla 12-1. Registro de lluvia para calibración	61
Tabla 12-2. Variables hidrológicas subcuencas Torcoroma para calibración	63
Tabla 12-3. Rugosidades de Manning. (Posey, 1941).....	64
Tabla 12-4. Coeficiente de determinación para calibración de modelo	65
Tabla 13-1. Tiempo de concentración cuenca Torcoroma.	68
Tabla 13-2. Tiempo de concentración subcuencas Torcoroma.....	68
Tabla 13-3. Variables para ajuste en tiempo de concentración.....	69
Tabla 13-4. P valie coeficientes regresión lineal.....	70
Tabla 13-5. Estadísticos de ajuste regresión lineal.....	70
Tabla 14-1. Variables geomorfológicas cuenca Felicidad para tiempo de concentración	71
Tabla 14-2. Tiempo de concentración subcuencas Felicidad	72
Tabla 14-3. Rugosidades subcuencas Felicidad	73
Tabla 15-1. Precipitación acumulada en tormenta pluviómetros cuenca Felicidad	74
Tabla 15-2. Duraciones de lluvia para cada pluviómetro de la cuenca Felicidad	74
Tabla 15-3. Caracterización de lluvia 23 de Agosto de 2014	76
Tabla 16-1. Categorías de peligrosidad	81
Tabla 16-2. Niveles de peligrosidad implementados en arroyos de Barranquilla	81
Tabla 17-1. Variables máximas Elemento 1: Carrera 27 – Calle 71	84
Tabla 17-2 . Variables máximas Elemento 43: Carrera 43- Calle 50.....	86
Tabla 17-3 . Variables máximas Elemento 55: Carrera 54 – Vía 40 (Descarga Arroyo Felicidad)	88
.....	88

1 Introducción

La ciudad de Barranquilla localizada en las coordenadas 10.96389 Latitud,-74.79639 Longitud, se encuentra ubicada al norte de Colombia y es la capital del departamento del Atlántico. El clima de Barranquilla es de tipo tropical, caracterizándose por presentar dos periodos al año: uno seco y otro húmedo. El periodo seco comprende los meses de diciembre a marzo y la época húmeda comprende los meses de abril a noviembre. Meteorológicamente, presenta un periodo entre los meses de mayo a octubre, con lluvias que oscilan entre los 70 y 180 mm/mes, siendo este último el más lluvioso de todos. Por otro lado los meses entre diciembre hasta abril, son periodos secos con promedio de precipitación de 1 a 25 mm/mes. (CIOH, 2010)

La ciudad de Barranquilla presenta una marcada problemática en el manejo de las aguas pluviales, las cuales debido a la ausencia de un sistema de alcantarillado pluvial en gran parte de la ciudad, hace que estas fluyan de manera libre sobre las calles. De igual forma las altas pendientes en las calles y la ausencia de zonas permeables, hace que los volúmenes, caudales y velocidades de escorrentía sean lo suficientemente altos para traer consigo niveles de peligrosidad elevados, identificando así consecuencias tales como: parálisis en la malla vial; daños materiales, fundamentalmente averías en los vehículos; y en algunos casos pérdidas humanas.

Durante décadas se han registrado diversos daños a la ciudad, la cual hasta hace poco ha tomado diversas medidas de contingencia para mitigar esta problemática. Ejemplos claros de aplicación han sido desarrollados, como la canalización en la parte baja de los arroyos más peligrosos. Sin embargo esta medida puede un tiempo considerable se deben establecer medidas preventivas, permitiendo informarle a la comunidad sobre los niveles de peligrosidad en cada una de las calles por donde se originan y fluyen los principales arroyos durante los intensos eventos de lluvia.

A la fecha esta medida no ha sido posible materializarla debido a la falta de registros climáticos e hidrológicos en la ciudad, obligando a efectuar estimaciones teóricas a partir de ecuaciones usadas en otros países para el cálculo de los caudales picos en la descarga de cada uno de los arroyos.

A la fecha se han instalado equipos de medición, constituidos por pluviómetros, distribuidos espacialmente en sitios estratégicos de la ciudad con el fin de establecer una red de monitoreo que caracterice los eventos de la precipitación, y un sensor de nivel y velocidad ubicado en uno de los arroyos de la zona norte de la ciudad para obtener el registro de caudales, niveles y velocidades de la lámina de agua para distintos eventos de lluvia.

De esta manera es posible definir una metodología para el manejo del sistema de cuencas de la ciudad, obtener modelos calibrados a partir de registros históricos de precipitación, e identificar los caudales de respuesta para diversos eventos de lluvia. Informando a la comunidad sobre los niveles de peligrosidad existente en las diferentes calles por donde circulan los arroyos.

La siguiente investigación muestra el análisis y los resultados de una metodología que busca la implementación de un sistema de alerta temprana en la ciudad, utilizando como caso de validación el arroyo “La Felicidad” el cual fue calibrado a partir de registros de caudales y precipitación en un tramo del cauce denominado en este documento como “Calle 84”. Para ello se usó el modelo hidráulico e hidrológico PCSWMM, el cual es un software con soporte de la EPA SWMM5 (EPA Storm Water Management Model) que integra el análisis en 1 y 2 dimensiones con ayuda de sistemas de información geográfica (SIG). De esta forma obtuvieron los niveles de peligrosidad en cada uno de las calles del arroyo “La Felicidad” durante cada instante de la lluvia presentada.

2 Objetivos

2.1 Objetivo general

Desarrollar un modelo que permita implementar un sistema reactivo de alerta temprana para los arroyos en la ciudad de Barranquilla, donde se pueda establecer niveles de peligrosidad respecto a las velocidades y profundidades de flujo existente en cada una de las calles de un arroyo durante un evento de lluvia.

2.2 Objetivos específicos

- Caracterizar las condiciones morfológicas de las cuencas en estudio: Cuenca Torcoroma y Cuenca Felicidad.
- Definir una ecuación de tiempo de concentración para las cuencas de la ciudad de Barranquilla a partir de parámetros morfológicos de las cuencas urbanas.
- Proponer e implementar una metodología de calibración en cuencas no instrumentadas a partir de cuencas instrumentadas.
- Modelar un evento de lluvia real teniendo en cuenta la distribución temporal y espacial en la cuenca Felicidad, registrado por el sistema de monitoreo de la Universidad del Norte, pluvial.co.
- Clasificar e incorporar niveles de peligrosidad espacial y temporal en el arroyo Felicidad a través de la implementación del modelo de alerta temprana.

3 Justificación

Durante el proceso de expansión de la mancha urbana de la ciudad de Barranquilla, se ha visto la presencia de corrientes súbitas de agua sobre algunas calles durante fuertes eventos de lluvia, conociéndose comúnmente como “arroyo”. Dentro de las principales causas a esta problemática se encuentra la ausencia de un sistema de alcantarillado pluvial en más del 80 % de la ciudad, poca presencia de zonas permeables que permitan la infiltración de la escorrentía y las altas pendientes sobre las calles, aumentando las velocidades de flujo de la escorrentía y de esta manera incrementando los niveles de peligrosidad. Esta problemática ha dejado numerosas víctimas y daños a la ciudad, con lo cual es necesario definir alternativas en la mitigación de riesgo que representa a la comunidad estas corrientes durante las temporadas invernales. La Figura 3-1 muestra la capacidad de arrastre que un arroyo puede tener sobre las calles de Barranquilla.



Figura 3-1 . Vehículo arrastrado por arroyo en Barranquilla. (Joanpa, 2013)

Actualmente se están llevando a cabo proyectos de canalización en algunos arroyos de la ciudad, controlando de esta forma los volúmenes de agua que fluyen sobre las calles tras presentarse un evento de lluvia. No obstante, esta medida constituye una solución a mediano-largo plazo a fin de obtener una canalización del 100% de los arroyos de la ciudad. Esto sugiere implementar medidas preventivas que informen sobre la existencia de ellos y su nivel de peligrosidad a la comunidad.

Debido a la ausencia de información y a bases de datos de precipitación de poca calidad y/o cantidad, se ha visto en la necesidad de realizar estimaciones teóricas de caudales pico en la descarga de cada uno de los arroyos de la ciudad con estaciones climatológicas lejos del casco

urbano de la ciudad, obteniendo una alta incertidumbre en los caudales de salida que no pueden ser usados para obtener caudales en tiempo real a partir de lluvias presentadas.

Es por ello que se vio en la necesidad de desarrollar una metodología para la implementación de un sistema de alerta temprana que informe a la comunidad sobre el estado del cauce en cada una de las calles sobre el arroyo.

4 Estado del arte

En los últimos años, el alto crecimiento de la población en países en desarrollo ha venido presentando deterioro en la calidad de vida y medio ambiente. En América Latina se ha visto además una marcada transferencia de la población rural hacia las ciudades. La Figura 4-1 muestra la proporción de crecimiento en la urbanización observada en los países latinoamericanos en los últimos años. Puede observarse como en los países de América del Sur las tasas de urbanización sobrepasan el 70 % mientras que en América Central se encuentra cercano al 50%.

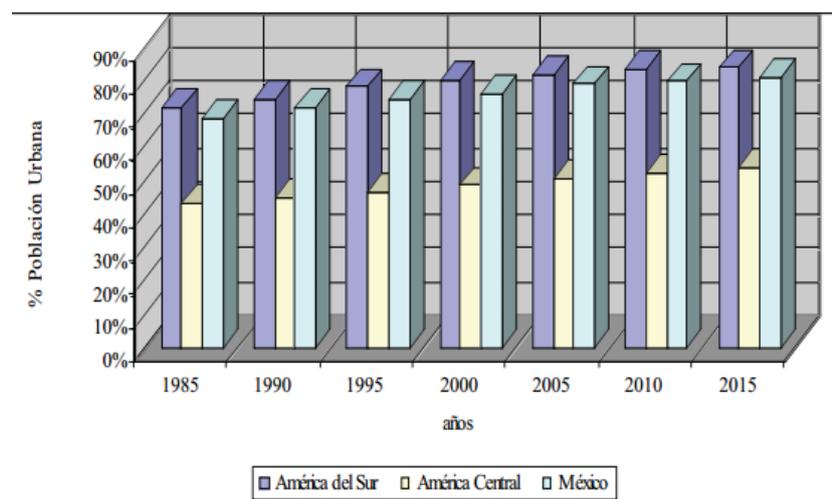


Figura 4-1. Urbanización en países de América Latina. (Tucci, 2007)

Dentro de los principales impactos y problemas que genera el alto crecimiento poblacional en países en desarrollo frente a la infraestructura urbana se encuentran los siguientes aspectos:

- Mayor concentración de población en áreas pequeñas
- Aumento del área metropolitana de las ciudades debido a la movilidad de las personas de zonas rurales a zonas urbanas
- Rápida urbanización con poco planeamiento territorial

En relación a la ausencia o inadecuado planeamiento territorial que puede manejar una ciudad frente al rápido crecimiento poblacional, se pueden encontrar diferentes enfoques. Dentro de la infraestructura del agua en el medio ambiente los aspectos más importantes a considerar, entre otros son:

- Falta de redes de drenaje pluvial, lo cual conlleva a que las ciudades sean susceptibles a presentar frecuentes inundaciones.
- Ocupación de zonas definidas como planicies de inundación

- Impermeabilización y canalización de ríos urbanos con aumento en caudales de crecida.
- Deterioro en la calidad de agua debido a la falta de tratamiento de efluentes, generando así riesgos de abastecimiento en otras poblaciones.

Dentro de estas consecuencias dadas por la falta de planeación en las ciudades respecto al manejo de las aguas y el medio ambiente, es importante resaltar la forma como históricamente ha sido afectada tanto la cantidad como la calidad de las aguas. En esta investigación se tratará el tema de cantidad de agua; específicamente al manejo de la escorrentía pluvial.

En las zonas urbanas, la escorrentía pluvial puede generar inundaciones debido al efecto de impermeabilización de los suelos (Tucci, 2007). Generalmente este tipo de inundaciones son vistas como locales ya que involucran cuencas de menor tamaño (Menores a 100 Km^2).

El desarrollo urbano, la pavimentación y la proporción cada vez menor de espacios verdes en relación con las zonas edificadas traen como consecuencia un aumento notable de los escurrimientos pluviales en las ciudades. En pequeñas poblaciones con bajo porcentaje de calles pavimentadas, terrenos baldíos intercalados y con casas generalmente provistas de fondos de tierra o jardines, la lluvia encuentra una gran proporción de zonas de infiltración con relación a las zonas impermeables. El agua que escurre de la lluvia con determinada intensidad sobre un área en esas condiciones, es muy inferior a la que se produce sobre una ciudad densamente urbanizada donde prácticamente el 100% de su superficie es impermeable.

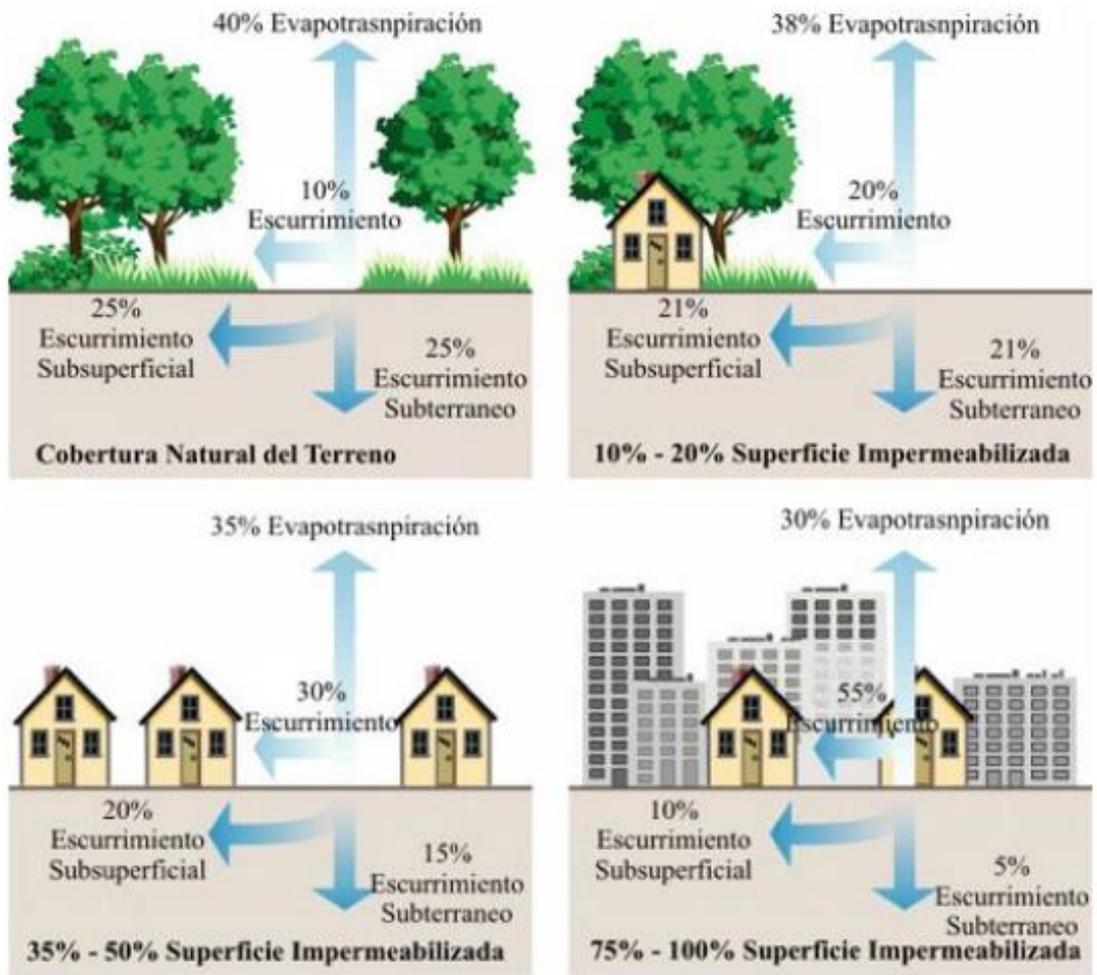


Figura 4-2. Relación entre impermeabilización y aumento del escurrimiento superficial. (Bertoni, 2008)

Si se analiza el comportamiento de la escorrentía de manera gráfica (poner el nombre de la figura) respecto al comportamiento del hidrograma, se puede observar que para sectores altamente urbanizados los caudales picos presentan la tendencia a ser mayores con menores tiempos de concentraciones en contraste con un hidrograma generado en la misma superficie, si se asume un mayor nivel de permeabilidad.

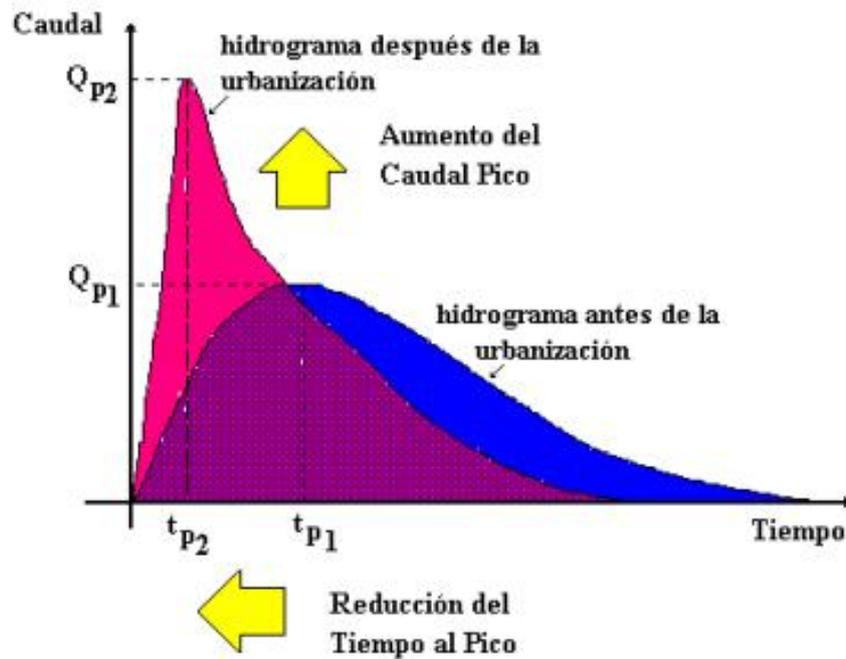


Figura 4-3. Impacto hidrológico de la urbanización: variaciones en el hidrograma. (Bertoni, 2008)

La ciudad de Barranquilla, dividida por dos vertientes como lo es la oriental y la occidental, ha venido presentando una problemática respecto a las cantidades de escorrentía generada para fuertes eventos de lluvia, fundamentalmente en la vertiente oriental debido a su alto nivel de impermeabilidad. Estas escorrentías drenan con altas velocidades debido a las pendientes medias de las calles que se encuentran entre el 2 y el 5 %. Trayendo de esta manera niveles de inundación con un nivel alto de riesgo asociado en las partes bajas de los cauces.

En Barranquilla, la precipitación promedio anual es de 850 mm basada en registros de la estación del IDEAM ubicada en el aeropuerto Ernesto Cortissoz. Para esta tasa de precipitación, 420 mm caen durante los meses de Agosto hasta Octubre siendo estos los más lluviosos del año (Avila, 2012). A partir de información de precipitación diaria, se ha desarrollado para la ciudad una curva de probabilidad de no excedencia de precipitación diaria (Figura 4-4) la cual muestra las magnitudes medias para distintos periodos de retorno.

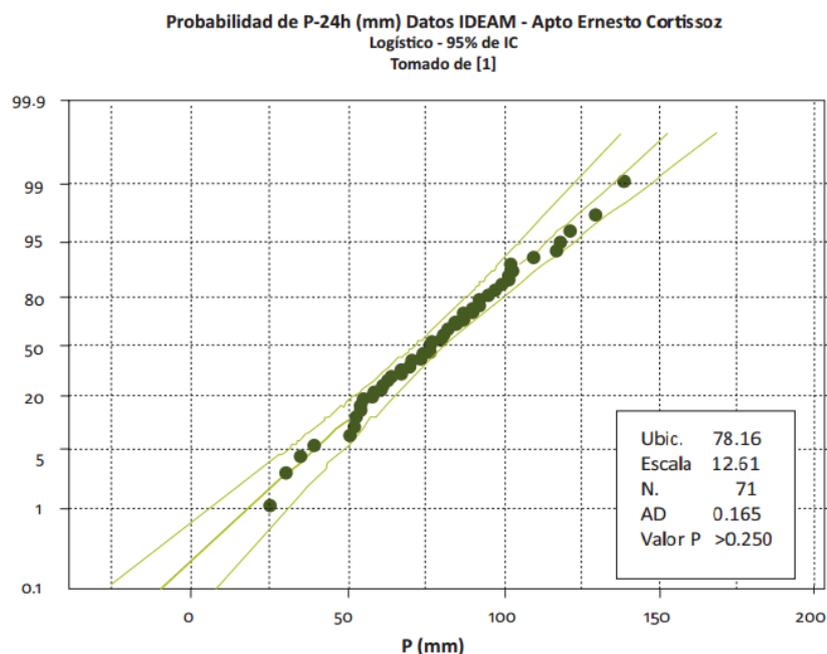


Figura 4-4 .v Probabilidad de no excedencia anual de precipitación máxima en 24 horas - Estación Aeropuerto Ernesto Cortissoz

En un estudio realizado por Ávila (2012) se recopiló información secundaria de pendientes, coeficientes de permeabilidad y geomorfología de cuencas, y se realizaron estimaciones de caudales y velocidades de los principales arroyos de la vertiente oriental. Para este caso tomaron como punto de concentración la Vía 40 y la Calle 30. Los resultados de las estimaciones elaboradas en este estudio se encuentran en la Tabla 4-1 y Tabla 4-2

Tabla 4-1. Caudales pico en puntos de concentración estimados para distintos periodos de retorno

CUENCA	Longitud del Arroyo	ÁREA CUENCA (Ha)	Caudal pico estimado en punto de concentración (m ³ /s)					
			2 años	5 años	10 años	25 años	50 años	100 años
Calle 91	4186	284	35	47	56	67	76	87
Siape	1408	274	34	46	54	64	74	84
Country	5163	534	58	78	92	110	127	144
Coltabaco	3845	121	17	23	27	33	37	42
Carrera 65	4590	369	45	61	72	86	99	113
Felicidad	5759	422	46	62	73	87	100	114
La Paz	2903	78	12	16	19	22	26	29
Hospital	3754	223	27	37	44	52	60	68
Rebolo	4826	543	59	80	94	113	129	147
Don Juan	7906	857	83	112	132	159	183	208

Tabla 4-2. Velocidades estimadas para caudales picos en punto de concentración

CUENCA	Longitud del Arroyo	ÁREA CUENCA (Ha)	Velocidad máxima estimada en punto de concentración (m3)					
			2 años	5 años	10 años	25 años	50 años	100 años
Calle 91	4186	284	5.5	6.2	6.6	7	7.4	7.7
Siape	1408	274	5.5	6.1	6.5	6.9	7.3	7.6
Country	5163	534	6.7	7.4	7.9	8.4	8.8	9.2
Coltabaco	3845	121	4.2	4.7	5	5.4	5.7	6
Carrera 65	4590	369	6.1	6.8	7.2	7.7	8.1	8.5
Felicidad	5759	422	6.1	6.8	7.2	7.7	8.1	8.5
La Paz	2903	78	3.7	4.1	4.4	4.7	4.9	5.2
Hospital	3754	223	5.1	5.7	6	6.4	6.8	7.1
Rebolo	4826	543	6.7	7.5	7.9	8.4	8.9	9.3
Don Juan	7906	857	7.6	8.4	8.9	9.5	9.9	10.1

La estimación de estos caudales y velocidades en los puntos de descarga de cada arroyo fue elaborada a partir del método NSCR (Singh, 2003), arrojando órdenes de magnitudes muy elevados si se toma como sección hidráulica una vía de ancho promedio de 7 metros. Aun cuando no se tengan registros de medición de estas variables hidráulicas en ningún cauce, es posible observar registros fotográficos (Figura 4-5) que evidencian la alta peligrosidad de cada uno de los arroyos en la ciudad. Debido a las altas velocidades de los arroyos, estos tienen la capacidad de arrastre suficiente para llevar un vehículo hasta las zonas bajas de descarga, de tal manera que una persona puede ser una víctima mortal si llegase a ser arrastrada por estos cauces.



Figura 4-5. Arroyo Barranquilla Calle 76- Septiembre 2010 Rafael Vega.

A lo largo de la historia de la ciudad, se ha conformado una base de datos donde se registran las víctimas que se han presentado en cada uno de los arroyos. Según el sitio web Arroyos de Barranquilla hasta la fecha se han reportado 89 muertos producidos por arrastre en los arroyos en toda la ciudad bajo distintas circunstancias. La Figura 4-6 muestra las distribuciones de estas víctimas bajo diversas causas y en cada uno de los arroyos.

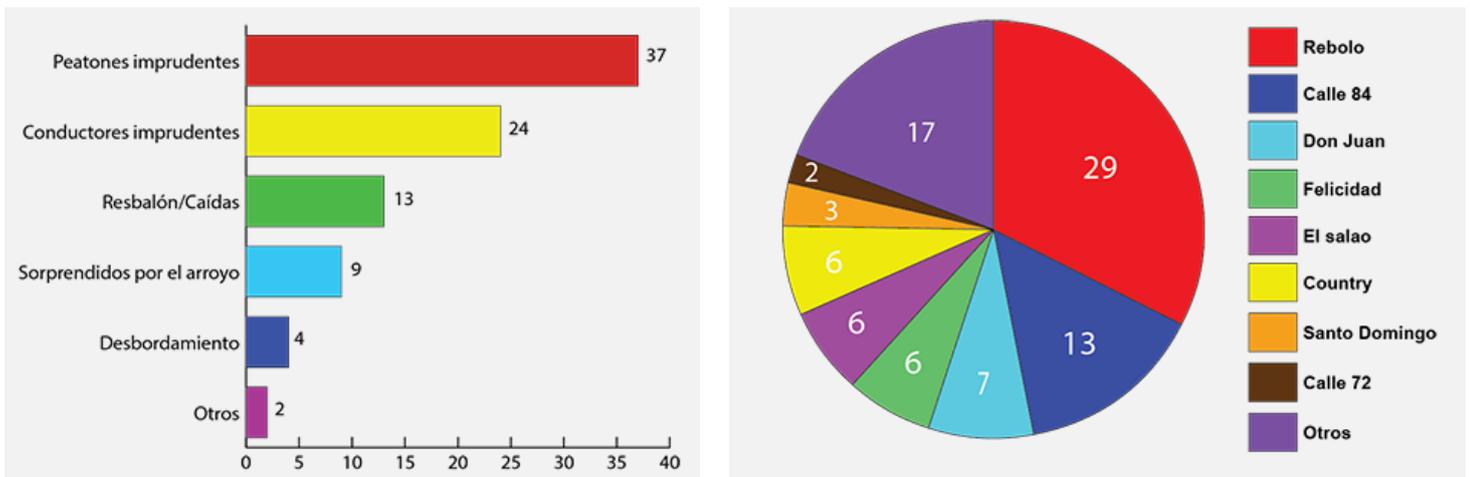


Figura 4-6. Distribución de muertes por arroyos en Barranquilla. Fuente: www.arroyosdebarranquilla.co

Actualmente se están llevando a cabo proyectos de canalización sobre algunos arroyos de la ciudad, buscando conducir de manera segura los niveles de escorrentía en las partes bajas de los cauces. En los meses de abril y marzo del año 2014, comenzaron algunos proyectos de canalización en la parte baja de la cuenca Siape y Country, y se espera que a inicios de julio de 2015 se empiece la canalización del arroyo Felicidad en su tramo final

Sin embargo, la ejecución de todos los proyectos de canalización en la ciudad es un proceso a largo plazo y por lo tanto la ciudad seguirá expuesta a presentar víctimas en eventos futuros eventos de precipitación. Es por ello que se deben plantear soluciones alternativas en el manejo de la escorrentía pluvial que brinden a la población información concerniente a las condiciones de cada uno de los arroyos, mostrando los niveles de peligrosidad actuales y futuros que se pueden llegar a presentar. Estas medidas deben tener en cuenta la gestión del riesgo de inundación y sus implicaciones de tipo social, cultural, educacional y de comunicación (Escuder, 2010)

A lo largo del mundo, se han desarrollado un sinnúmero de proyectos de prevención de riesgo para problemas de inundación. Dentro de los más relevantes se encuentra el proyecto europeo SUFRI (Sustainable Strategies of Urban Flood Risk Management with non-structural measures to cope with the residual risk), cuyo principal objetivo es mejorar la gestión de riesgo de inundación mediante medidas no estructurales. A partir de ello este proyecto se busca definir estrategias sostenibles de gestión de riesgo, incluyendo sistemas de advertencia, análisis de vulnerabilidad y comunicación del riesgo para optimizar el control de desastre (Escuder, 2010)

Para el caso de inundaciones pluviales, la metodología SUFRI propone una clasificación de distintas categorías con base a la existencia de sistemas de aviso a la población en relación a las condiciones hidráulicas de la escorrentía. Cada una de las categorías se asocia a valores de tasas de mortalidad (Penning-RowSELL, Floyd, & Ramsbottom, 2005) en función del grado de severidad de la inundación. Para estos estudios los niveles de peligrosidad están en función de la profundidad y velocidad de escorrentía, siendo el producto de estas el indicador de peligrosidad en unidades de m^2/s . La Tabla 4-3 muestra los niveles de severidad en la peligrosidad clasificados a partir del proyecto SUFRI.

Tabla 4-3. Niveles de severidad en inundación pluvial.

	Nivel de severidad (S)	Calado y(m)	Velocidad v(m/s)	Parámetro Vuelco y*v (m^2/s)	Parámetro Deslizamiento v^2* y (m^3/s^2)
S0	No se esperan víctimas	<0.45	<1.5	<0.5	<1.23
S1	Severidad leve. Peatones pueden sufrir pérdida de estabilidad y dificultades para caminar +	<0.8	<1.6	<1	<1.23
S2	Severidad media. Significativas pérdidas de estabilidad. Vehículos pierden adherencia	>1	<1.88	<1	<1.23
S3	Severidad elevada. Alto riesgo para personas situadas en el exterior. Arrastre de vehículos	>1	>1.88	>1	>1.23
S4	Severidad extrema. Daños estructurales a edificios	>1	>1.88	>3	>1.23

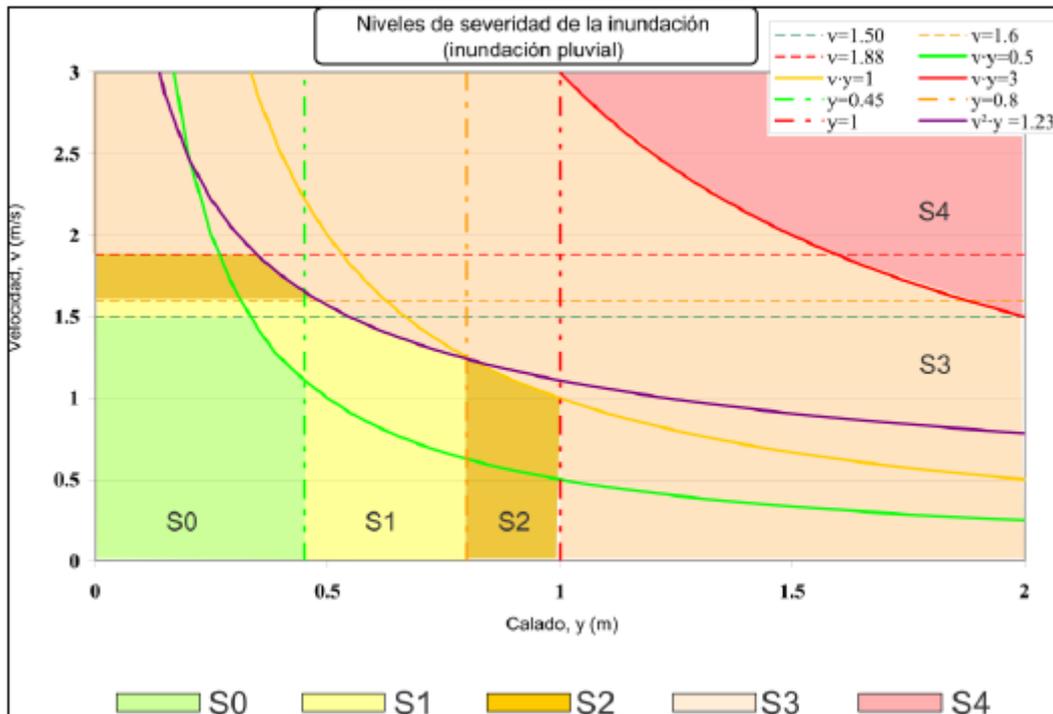


Figura 4-7. Gráfico para la obtención de niveles de severidad en inundación pluvial. (Escuder, 2010)

El proyecto “ARR Project 15 2D Flood Modelling in Urban Areas” y “ARR Project 10 People and Vehicle Stability” desarrollado por la UNSW en Australia, han valorado el peligro por inundaciones pluvial, realizando análisis a partir de modelaciones numéricas (Smith, 2000). Este análisis parte de igual forma en que la evaluación del riesgo de inundaciones se debe a relación entre la profundidad y velocidad del flujo.

A partir de inundaciones presentadas en Queensland-Australia en el año 2011, se realizaron modelaciones que permitiesen valorar la peligrosidad de flujo en ciertos sectores, desarrollando mapas de riesgo teniendo en cuenta la variación de la profundidad y velocidad de flujo. Los resultados de estos análisis se presentan en la Figura 4-8.

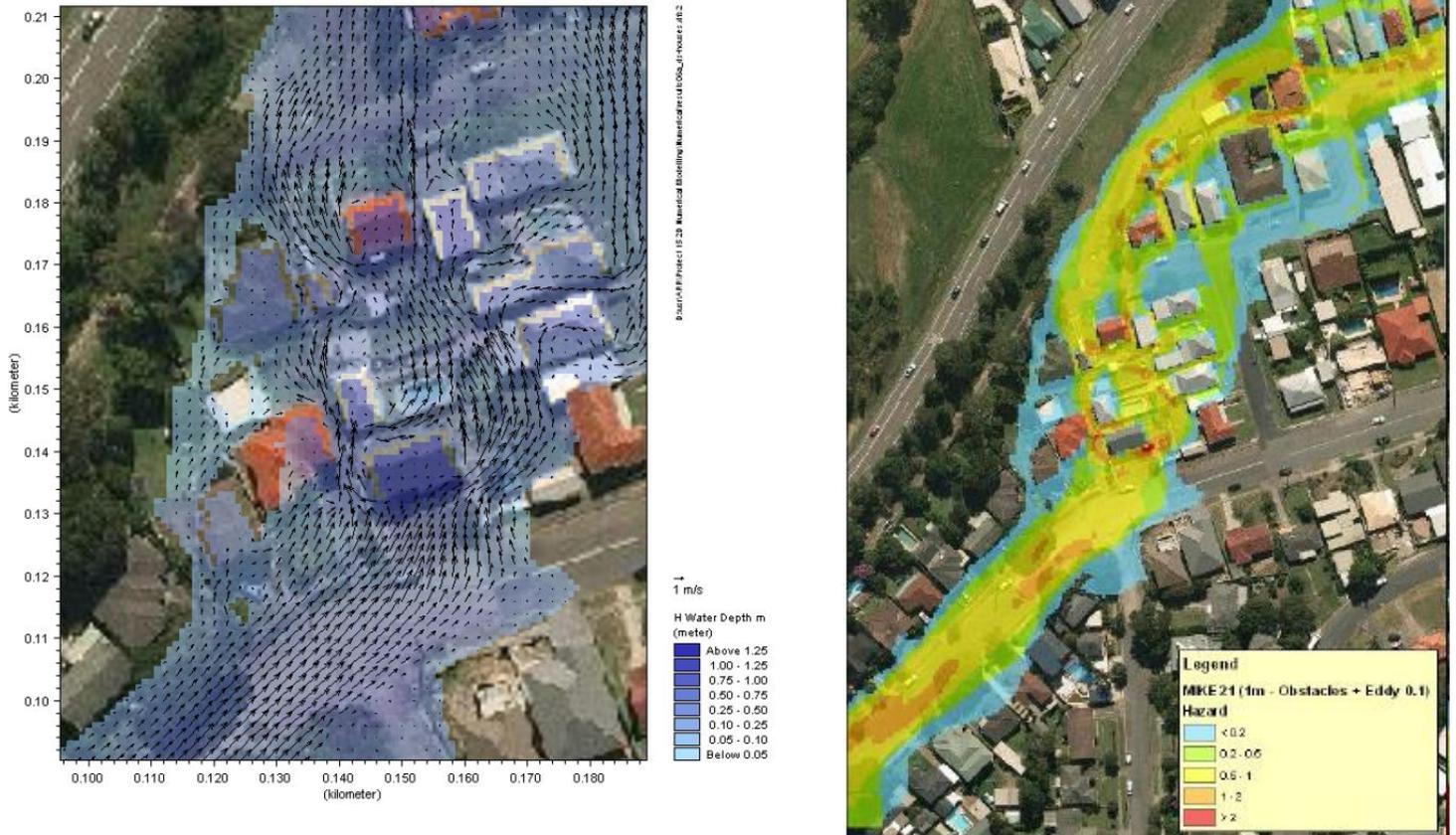


Figura 4-8. Modelo de inundación pluvial y valoración de peligrosidad. (Smith G P, 2012)

Por otra parte los criterios de peligrosidad para escenarios de inundación fueron obtenidos a partir de análisis hidrodinámico buscando obtener las variables a la cual una persona o un vehículo pueden perder inestabilidad y ser arrastrado por un fluido como el agua. En estos escenarios la inestabilidad de una persona o un vehículo ocurre cuando un momento inducido por el flujo excede el momento resistente generado por el peso del cuerpo (Abt, 1989). La Figura 4-9 muestra el esquema propuesta para estudiar el efecto de inestabilidad de una persona a partir del momento inducido por un fluido.

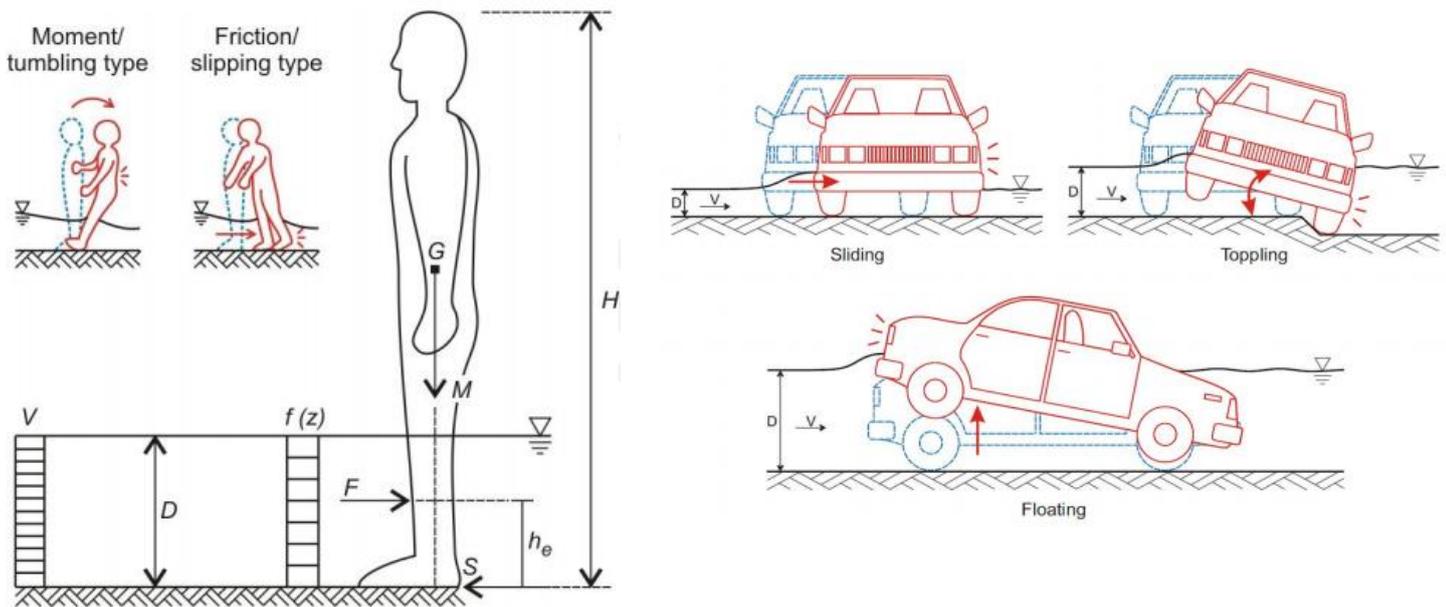


Figura 4-9. Modelos de inestabilidad de personas y vehículos (Shand, 2011)

De esta manera Cox (2010), plantea distintos niveles de peligrosidad que dependen de las variables de profundidad y velocidad del flujo de agua. Dependiendo del peso del objeto en estudio (Niño, persona adulta o vehículo) se plantearon varias categorías de peligrosidad mostradas en la Tabla 4-4

Tabla 4-4. Cuantificación de peligrosidad bajo condiciones de flujo. (Cox, 2010)

DV (m ² /s)	Niños (H.M = 25 kg a 50 kg)	Adultos (H.M> 50 Kg)
0	Ninguna peligrosidad	Ninguna peligrosidad
0- 0.4	Peligrosidad baja; Peligro para profundidad < 0.5 m y velocidades < 3m/s	Peligrosidad baja; Peligro para profundidad < 0.5 m y velocidades < 3m/s
0.4-0.6	Peligrosidad moderada; Peligroso para profundidades < 0.5 m y velocidades > 3m/s	
0.6-0.8	Peligrosidad muy alta	Peligrosidad moderada; Peligroso para profundidades < 0.5 m y velocidades > 3m/s
0.8-1.2		Peligrosidad alta; Peligro para profundidad < 1.2 m y velocidades < 3m/s
>1.2		Peligrosidad muy alta

A partir de estudios realizados en la valoración de peligrosidad es posible relacionar variables hidráulicas (caudal, velocidad y peligrosidad) de cada arroyo para mostrar establecer los niveles de peligrosidad y de esta manera generar reportes a la comunidad. Sin embargo es necesario que los modelos simulen la respuesta de cada una de los arroyos de manera precisa hacia un evento de lluvia. Para ello se debe obtener información hidrológica sobre la cuenca que requiera determinar los tiempos de respuesta hacia distintos pulsos de lluvia. Una de las principales variables para determinar la respuesta de una cuenca es el tiempo de concentración.

El tiempo de concentración es una variable extensivamente usada en el diseño hidrológico para la determinación de la capacidad hidráulica en diferentes estructuras (Jorge Julián Vélez Upegui, 2010). Esta variable es propia de cada sector, depende de las características geomorfológicas de cada cuenca y es una medida de la respuesta de un evento de lluvia. Comúnmente el tiempo de concentración se concibe como el tiempo equivalente que tarda una gota de agua caída desde el punto más alejado de la cuenca hasta el punto de descarga o concentración.

A lo largo del mundo se han desarrollado ecuaciones para medir el tiempo de concentración en cuencas en particulares a partir de datos observados tanto de precipitación como de lluvia. De esta manera se pueden relacionar variables hidrológicas e hidráulicas características con los tiempos de concentración observados y construir ecuaciones características.

La Tabla 4-5 muestra ecuaciones usadas para el cálculo del tiempo de concentración, desarrolladas en cuencas de otros países con características distintas tanto en las variables morfométricas de las cuencas como de las condiciones de precipitación del sector. La metodología aplicada para determinar el tiempo de concentración en cuencas regionales, consiste en tomar aquella que posea características similares con la cuenca a la que se está realizando el estudio; y en algunos casos suele emplearse un promedio entre distintas ecuaciones.

Tabla 4-5. Métodos comúnmente usados para la estimación del tiempo de concentración en minutos.
(Durrans, 2007)

Ecuación	Fuente	Descripción
$tc = 60 LA^{0.4} / DS^{0.2}$	Williams (1922)	Cuencas con área menor a 50mi ²
$tc = KL^{0.77} / S^n$	Kirpich (1940)	Desarrolladas para cuencas pequeñas de Tennessee y Pennsylvania, con área desde 1 a 112 acres
$tc = (2LN/3S^{0.5})^{0.47}$	Hathway (1945) Kerby (1059)	Cuencas con área menor a 10 acres y pendientes menores a 0.01
$tc = 300 (L/S)^{0.5}$	Johnstone y Cross (1949)	Desarrollada para cuencas en Scotie y Sandusky River (Ohio) con área entre 25 and 1624 mi ²
$tc = \left\{ \frac{0.007I + c}{S^{0.33}} \right\} x (IL/43200)^{-0.67} L/60$	Izzard (1946)	Ecuación hidráulicamente desarrollada
$tc = 0.94 I^{-0.4} \left(\frac{Ln}{S^{0.5}} \right)^{0.6}$	Henderson y Wooding (1964)	Basado en la teoría de onda cinemática para flujos en superficies planas
$tc = 1.8 \frac{(1.1 - C)L^{0.5}}{S^{0.33}}$	Federal Aviation Agency (1970)	Desarrollada basado en drenaje de aeropuertos
$tc = \frac{1}{60} \sum (L/V)$	Soil Conservation Service (1986)	Tiempo de concentración es desarrollado como la suma de los tiempos de viajes de tramos individuales

Sin embargo, la implementación de ecuaciones generadas en otras regiones puede ocasionar incertidumbre y falta precisión a la hora de obtener la respuesta de las cuencas en la ciudad de Barranquilla, principalmente si se desea implementar un sistema de alerta temprana.

Por otra parte, puede ser calculado de manera gráfica el tiempo de concentración para una cuenca, considerando el tiempo base (T_b) de un hidrograma de salida, el cual se refiere al tiempo que transcurre entre el momento en que llegan las componentes de la escorrentía generada por la lluvia y el momento en que éstas dejan de actuar. El tiempo de concentración T_c se define de esta manera como el tiempo en el que la escorrentía superficial del punto más alejado de la cuenca alcanza el punto de desagüe.

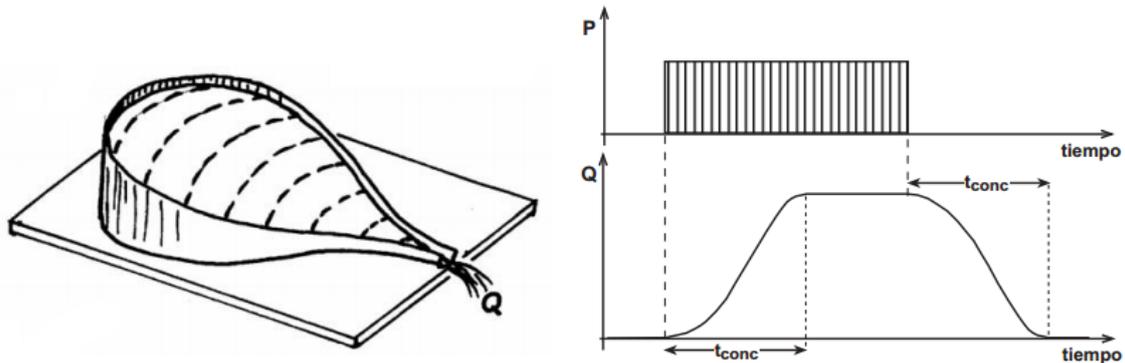


Figura 4-10. Tiempos característicos en un hidrograma para la estimación del tiempo de concentración. (Jorge Julián Vélez Upegui, 2010)

El tiempo de concentración puede ser definido como el tiempo comprendido entre el final de la precipitación efectiva y el final de la escorrentía superficial directa (Taylor, 1952)

$$T_c = T_b - d$$

Donde T_c es el tiempo de concentración, T_b es el tiempo base del hidrograma de escorrentía y d es la duración de la precipitación efectiva.

De esta manera, a partir de la implementación de una ecuación que considere el tiempo de concentración para las cuencas de la ciudad, es posible estimar con mayor precisión los tiempos de respuesta de cada cuenca permitiendo así obtener menor incertidumbre en el cálculo de las variables hidráulicas en cada arroyo, las que en última instancia condicionen los niveles de peligrosidad para la generación del sistema de alerta temprana que es lo que se buscará en esta investigación.

5 Zona de estudio

Barranquilla se encuentra dividida en dos vertientes: La Occidental y la Oriental (Figura 5-1.a), cada una con características distintas. Por un lado la vertiente Oriental se encuentra altamente urbanizada con suelos típicamente arenosos y no cuenta con un sistema de alcantarillado pluvial definido en casi un 90% de su área; por el otro lado la cuenca Occidental se encuentra en proceso de expansión urbana, con suelos predominantemente arcillosos.

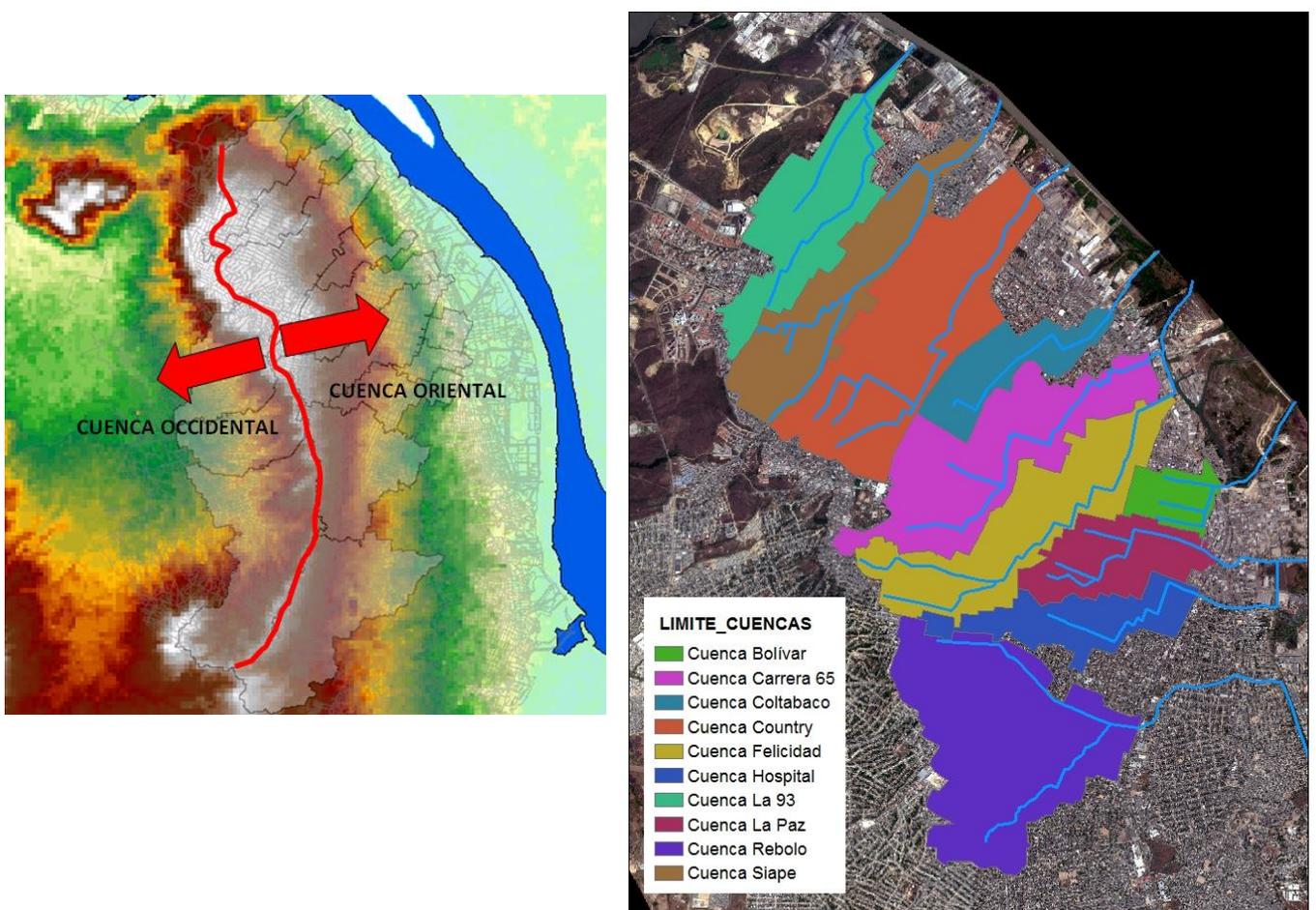
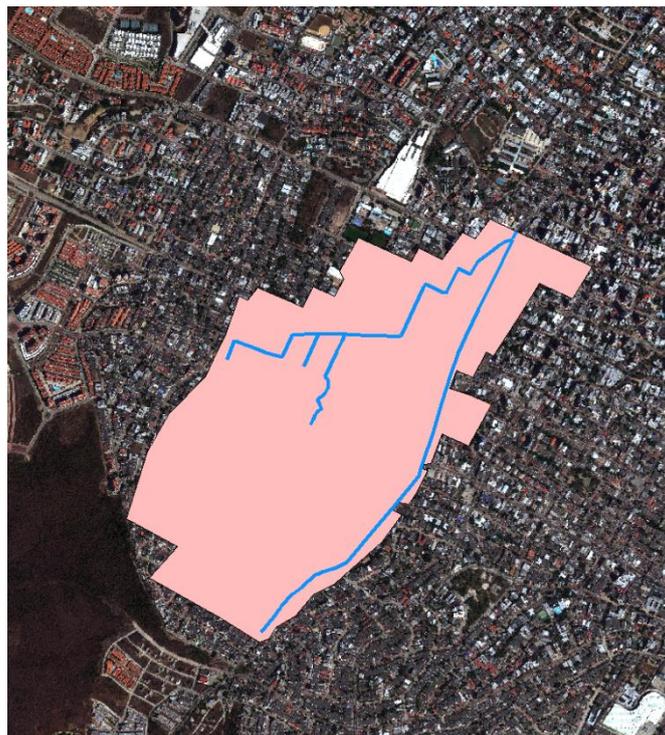


Figura 5-1. Cuenca Oriental y Occidental en la ciudad de Barranquilla (a), Subcuencas urbanas Barranquilla vertiente oriental (b)

Dentro de la vertiente Oriental, se identifican varias cuencas (Figura 5-1.b) definidas cada una por un arroyo. Actualmente todas las cuencas cuentan con información de precipitación desde finales del año 2014 a partir de la red de monitoreo “Pluvial” desarrollada por la Universidad del Norte, sin embargo la única que cuenta con registro de caudales, velocidades y niveles es un

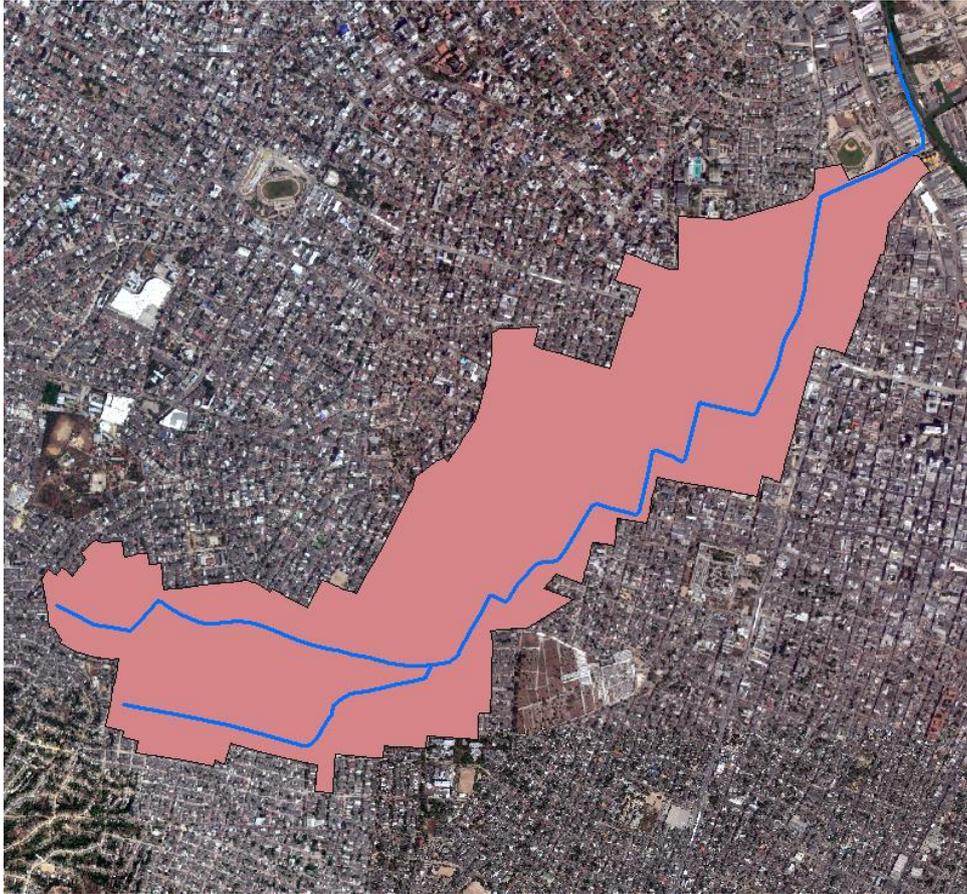
tramo de la cuenca Siape donde se instaló un sensor de nivel y velocidad en el sector de la Iglesia Nuestra Señora de las Gracias Torcoroma.

A partir de la ubicación de este sensor, se estableció esta posición como punto de concentración y se definió la respectiva subcuenca asociada a este punto denominada cuenca “Torcoroma”.



La cuenca “Torcoroma” donde existe registro de precipitación y de caudales en la descarga, es la única instrumentada en la ciudad y a la cual pueden desarrollarse modelos de calibración que permitan identificar las variables hidrológicas, cuyos resultados arrojarán un buen ajuste.

A partir del modelo calibrado de la cuenca “Torcoroma”, se buscará definir criterios de calibración para las demás cuencas de la ciudad que no se encuentran instrumentadas. Para este caso se tomó la cuenca “Felicidad” cuyo cauce principal es el arroyo “La Felicidad” conocido por el evento presentado en el año 2011 dejando severos daños en la carrera 43 con calle 50.



De esta manera se buscará implementar la metodología propuesta en esta investigación para evaluar la peligrosidad del arroyo “La Felicidad” a partir de lluvias presentadas a mediados del año 2014 y de igual forma con lluvias sintéticas.

6 Metodología

La metodología desarrollada para esta investigación está orientada a la implementación de un sistema de alerta temprana en uno de los principales arroyos de la ciudad en el cual se tenga registro durante el transcurso de la lluvia de variables las hidráulicas en las calles del arroyo tales como caudales, velocidades y niveles; y de esta forma asociar el nivel de peligrosidad y riesgo existente para cada instante y calle.

De esta forma es necesario realizar una caracterización de los cauces y cuencas en estudio dado que se deben simular con la mayor precisión posible la respuesta hidrológica del cauce para un determinado pulso de lluvia. Para ello se llevaron a cabo recorridos de campo identificando las condiciones de drenaje de las cuencas de estudio, definiendo áreas permeables y definiendo las direcciones de flujo de agua sobre las calles al considerar la inclinación de esta. Este recorrido fue muy importante para definir y verificar las áreas de drenaje aportante a cada arroyo así como para definir puntos de concentración para la generación de subcuencas.

Una vez definida la divisoria de cada cuenca (Cuenca “Torcoroma”, cuenca “Felicidad”), se calcularon todas las propiedades geomorfológicas tales como área, perímetro, longitud de cauce, entre otras, a partir de la dirección de flujo de cada una de las calles hasta su punto de descarga. Estas propiedades fueron determinadas debido a que se buscará relacionar las características de la cuenca instrumentada de establecer una metodología que permita calibrar una cuenca no instrumentada con características similares.

Para propósitos de esta investigación, los modelos se generaron a partir del software PCSWMM el cual permite variar ciertas variables hidrológicas para cada subcuenca y que son presentados a continuación.

- Área (Ha)
- Ancho (m)
- Longitud (m)
- Pendiente (%)
- Porcentaje de Impermeabilidad
- N de Manning zonas impermeables
- N de Manning zonas permeables
- Almacenamiento zonas impermeables (mm)
- Almacenamiento zonas permeables (mm)

Algunas de las variables pueden ser medidas en campo o a partir de información geográfica: área, ancho, longitud, pendiente y zonas impermeables. Sin embargo no es posible obtener

información en campo sobre las rugosidades dadas a partir del n de Manning o la altura de almacenamiento máximo para cada zona. De esta forma se determinarán las primeras variables para cada una de las áreas de drenaje de interés y la calibración consistirá en la variación de las rugosidades buscando el mejor ajuste obtenido entre los hidrogramas calculados en la descarga y los observados por el sensor de nivel y velocidad, ubicado en el punto de concentración de la cuenca instrumentada (Torcoroma). Dado que el parámetro de rugosidad presenta mayor sensibilidad para el Hidrograma de salida, la tasa de almacenamiento se mantendrá fija, enfocando la calibración en este único parámetro.

Una vez calibrada la cuenca instrumentada (Cuenca "Torcoroma") se medirá de manera gráfica el tiempo de concentración de cada una de las subcuencas de Torcoroma a partir del método racional explicado posteriormente. A partir de todas las subcuencas Torcoroma, se generará una regresión lineal que tenga como variable de salida el tiempo de concentración observado, y las variables de entrada estarán dadas por características hidrológicas de cada subcuenca obtenidas anteriormente tales como: área, longitud de la cuenca, pendiente de la cuenca y porcentaje de permeabilidad. Mediante esta regresión se podrá obtener una ecuación para el tiempo de concentración que podrá ser usada para otras cuencas de la ciudad asumiendo que cumplen con características similares a las subcuencas de Torcoroma.

La ecuación del tiempo de concentración será aplicada a una cuenca no instrumentada como lo es la cuenca Felicidad a la cual se le efectuará el análisis de peligrosidad sobre su cauce a partir de la implementación del sistema de alerta temprana que propone esta investigación.

Una vez determinado el tiempo de concentración para cada una de las subcuencas a partir de la ecuación planteada, será posible calibrar cada una de las subcuencas variando los parámetros hidrológicos de tal forma que el tiempo de concentración obtenido gráficamente para cada subcuenca sea igual al calculado por la ecuación. La estimación adecuada en los tiempos de concentración en la cuenca Felicidad permitirá obtener tiempos de respuesta cercanos a la realidad que permitan una menor incertidumbre en los reportes generados para el sistema de alerta temprana.

Con la cuenca Felicidad calibrada, se utilizará registro de lluvias de estaciones pluviométricas cercanas para medir los niveles de precipitación generados sobre la cuenca para distintos eventos de lluvia. Para ello se realiza una triangulación por polígonos de Thiessen analizando las áreas de incidencia en precipitación sobre cada una de las subcuencas. Este proceso se realizará bajo el supuesto que la distribución temporal y espacial de un evento de lluvia no se mantiene de manera uniforme sobre una misma cuenca, sino que varía según las áreas de incidencia de cada estación.

Dadas las condiciones topográficas de las cuencas en Barranquilla, donde las altas pendientes hacen que la escorrentía drene con altas velocidades, se deberá contar con información lo

suficientemente precisa con lo cual se pueda informar a la comunidad sobre los reportes de peligrosidad en los arroyos en el menor tiempo posible. Para lograrlo los eventos de lluvia utilizados deberán tener información de pulsos en intervalos 1 minuto dando una mayor precisión en la evolución de los niveles de peligrosidad.

En el caso de simulación implementado con el software PCSWMM, se correrá el evento de lluvia teniendo en cuenta la acumulación de pulsos que se vayan dando en cada instante de tiempo, obteniendo un Hidrograma de caudal, velocidad y profundidad para cada acumulación de pulsos. De esta manera es posible determinar el incremento en la peligrosidad la cual estará en función de la profundidad y velocidad de flujo.

De esta manera es posible generar una gráfica de nivel de peligrosidad donde se pueda pronosticar las futuras alertas a partir de reportes, que indique el tiempo en que se esperará tener cierto nivel de peligrosidad. Cada calle tendrá una gráfica asociada que se irá actualizando en el tiempo y el usuario tendrá reporte en tiempo real sobre las condiciones en todas las calles del cauce.

7 Recorrido de Campo

Dentro de la caracterización de cada uno de los arroyos de estudio, fue necesaria la identificación en campo de las condiciones de drenaje del sector. Para ello se hicieron recorridos sobre las calles identificando las áreas de aporte y se delimitó la divisoria de la cuenca de cada arroyo. Esta divisoria fue elaborada definiendo la dirección de flujo en cada calle lo cual resulta ser fácil de obtener a simple vista dada las pendientes de las calles. Por otro lado se identificaron distintas áreas verdes en las cuencas tales como parques, jardines que tuviesen la función de zonas permeables capaces de retener e infiltrar escorrentía.

Tanto para el recorrido de la cuenca Torcoroma como de la cuenca Felicidad, se identificaron sectores que permitían caracterizar de manera general las condiciones de drenaje, viendo factores que pueden evidenciar las fuertes corrientes presentadas para eventos de lluvia, así como áreas potencialmente aplicables para la implementación de sistemas de retención.

7.1 Recorrido de campo Torcoroma

La Figura 7-1 muestra el procesamiento del recorrido de campo de la cuenca Torcoroma, donde se identificó la dirección de flujo de cada una de las calles que drenan hacia el cauce. Por otra parte se realizó un registro fotográfico (Figura 7-2, Figura 7-3 y Figura 7-4) que permitió caracterizar las condiciones de drenaje de la cuenca. En ella se puede ver dos zonas permeables definidas como parques en espacio público que permitirían la retención temporal de la escorrentía. Este tipo de espacios no se identificó de manera frecuente, sin embargo existen zonas privadas como colegios que cuentan con este tipo de áreas. Por otro lado, fue común encontrar jardines en vivienda con confinamiento (Figura 7-3) imposibilitando que la escorrentía drene hacia estas áreas.



Figura 7-1. Direcciones de flujo cuenca Torcoroma



Figura 7-2. Parque Venezuela. Carrera 44 Calle 88 (Cuenca Torcoroma)



Figura 7-3. Carrera 50 Calle 88 Esquina (Cuenca Torcoroma)



Figura 7-4. Calle 87a Carrera 42e (Cuenca Torcoroma)

7.2 Recorrido de campo en cuenca Felicidad

Dentro de la cuenca Felicidad se pudieron distinguir las zonas públicas con áreas verdes, entre ellas canchas de arena con área aproximada de 4000 m² (Figura 7-6). Sin embargo las viviendas presentan menos zonas verdes (Figura 7-7), y en aquellos casos que la posean es más notorio el confinamiento evidenciando un poco capacidad de retención a través de los jardines existentes.



Figura 7-5. Direcciones de flujo cuenca Felicidad



Figura 7-6. Cancha Nueva Granada - Carrera 29 Calle 64 (Cuenca Felicidad)



Figura 7-7. Vivienda Carrera 34 Calle 55 (Cuenca Felicidad)

8 Morfologías de cuencas

La caracterización de las cuencas de estudio consistió en la realización de un estudio geomorfológico con que permita conocer cuantitativamente las condiciones de drenaje. Para ello se estimaron parámetros de forma y relieve usados ampliamente en el estudio hidrológico de cuencas que permitirá tener información general dentro de la caracterización

8.1 Área y Perímetro de la Cuenca

El área y perímetro de la cuenca representa el factor más importante en la relación escorrentía-característica morfológica. Estas variables tienen una incidencia sobre el volumen potencial de escorrentía generado y el tiempo de respuesta para un evento de lluvia, para el análisis de peligrosidad realizado la identificación del área y perímetro de las cuencas de estudio fue determinado a partir de recorridos de campos y mediante el uso de herramientas de información geográfica. La Tabla 8-1 resume las principales características de las cuencas.

Tabla 8-1. Área y Perímetro de cuencas

Cuenca	Área (Ha)	Perímetro (Km)
Torcoroma	143	6.3
Felicidad	336	14

8.2 Longitud del cauce principal y ancho

La longitud de la cuenca viene definida por la longitud de su cauce principal, siendo la distancia equivalente que recorre el cauce entre el punto de desagüe aguas abajo y el punto situado a mayor distancia topográfica aguas arriba (Asensio, 2011). Este parámetro influye en gran medida en la generación de escorrentía y es por ello que se debe determinar para la mayoría de los cálculos morfométricos.

El perímetro es una medida que determina la forma de la cuenca. Para una misma superficie, los perímetros de mayor valor corresponden a cuencas alargadas mientras que los de menor valor corresponden a cuencas redondeadas.

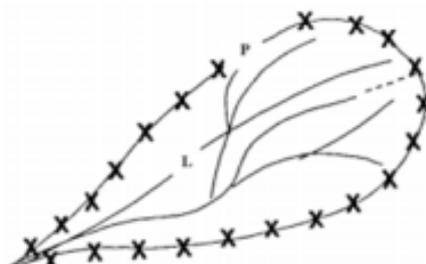


Figura 8-1. Longitud y perímetro de una cuenca

Finalmente, el ancho se define como la relación entre el área y la longitud de la cuenca, la cual se denota como W y se calcula de la siguiente manera:

$$W = \frac{A}{L}$$

Dónde:

A: Superficie de la cuenca

L: Longitud de la cuenca Km

Tabla 8-2. Longitud y ancho de cuencas

Cuenca	Área (Ha)	Longitud (m)	Ancho (m)
Torcoroma	143	1900	900
Felicidad	336	4825	800

8.3 Coeficiente de forma

El coeficiente de forma es la relación entre el ancho medio de la cuenca y la longitud de su cauce principal. En la medida que el coeficiente de forma de una cuenca sea más bajo, estará menos sujeta a crecientes que otra del mismo tamaño pero con mayor coeficiente de forma. A continuación se muestra el coeficiente de forma para cada una de las cuencas.

Tabla 8-3. Coeficiente de Forma (Kf)

Cuenca	Coeficiente de forma
Carrera 65	0.17
Felicidad	0.16

8.4 Coeficiente de Gravelius

El coeficiente de Gravelius o coeficiente de compacidad relaciona el perímetro de la cuenca con el perímetro de una cuenca teórica circular de igual área, de esta manera el coeficiente de

Gravelius estima la relación entre el ancho promedio del área de captación y la longitud de la cuenca. Este coeficiente se calcula mediante la siguiente fórmula:

$$Cg = \frac{P}{2\sqrt{\pi A}}$$

Cg=Coeficiente de Gravelius

P=Perímetro de la cuenca

A=Superficie de la cuenca

Este valor es mayor o igual 1. En caso de que el resultado sea la unidad, se tiene una cuenca de forma circular.

Tabla 8-4. Coeficiente de Gravelius de cada cuenca

Cuenca	Coef. Compacidad
Torcoroma	1.92
Felicidad	1.84

9 Estimación de variables hidrológicas

9.1 Definición de subcuencas

Para cada una de las cuencas de estudio es necesaria la definición de subcuencas que permitan tener información detallada del cauce calle por calle. En ella se tomaron diferentes puntos de concentración obtenidos a partir de las direcciones de flujo de cada una de las calles. Cada una de las subcuencas representará un área de drenaje con diferentes características geomorfológicas que serán tomadas como base para el cálculo del tiempo de concentración.

9.1.1 Subcuencas Torcoroma



Figura 9-1. Subcuencas Torcoroma

Tabla 9-1. Características subcuencas Torcoroma

Nombre	Área (Ha)	Perímetro (m)	Ancho (m)	Longitud (m)
C1	4.7	1082	274	557
C2	4.3	1264	160	470
C3	8.2	1216	223	200
C4	5.2	1111	163	550
C5	5.0	1030	296	175
C6	7.5	1556	394	127
C7	8.9	1591	271	172
C8	4.7	890	183	266
C9	4.4	925	205	180
C10	9.2	1730	386	780
C11	29.9	2498	122	756
C12	7.4	1372	192	250
C13	3.7	774	214	350
C14	11.5	1557	339	244
C15	4.8	991	97	450
C16	15.4	2060	139	340
C17	3.9	984	119	332
C18	4.6	938	424	270

9.1.2 Subcuencas Felicidad



Figura 9-2. Subcuencas Felicidad

Tabla 9-2. Características subcuencas Felicidad

Nombre	Área (Ha)	Perímetro (m)	Ancho (m)	Longitud (m)
1	18.9	1842	496	380
2	5.2	1089	387	135
3	7.8	1547	182	430
4	20.1	1994	279	720
5	8.4	1268	495	170
6	10.8	1373	196	550
7	13.5	1743	325	415
8	8.0	1245	178	450
9	15.4	1864	328	470
10	8.2	1330	181	450
11	19.6	1977	545	360
12	15.5	2133	281	550
13	24.8	2823	302	820
14	23.5	2334	277	850
15	22.4	2367	236	950
16	30.1	3230	301	1000
17	29.0	2292	290	1000
18	23.8	3210	302	790
19	17.6	2224	234	750
20	14.6	1662	292	500

9.2 Pendiente de subcuencas

La definición de las pendientes de cada una de las subcuencas establecidas anteriormente es un factor que puede afectar significativamente el tiempo de concentración. De esta manera a mayor pendiente se esperará un menor tiempo de concentración a aquella que tenga menor pendiente.

Es necesario contar con información con la cual se puedan realizar estimaciones de variables hidrológicas de interés sobre la ciudad para propósitos de esta investigación. Para este caso se contaron con imágenes satelitales e información de elevaciones, las cuales se manejaron a través de herramientas de información geográfica (GIS). Dentro de la información de elevaciones se contaron con curvas de nivel para toda la ciudad con espaciamiento de cada 5 metros. A partir de las curvas de nivel, es posible realizar modelos de elevaciones digitales (MDE) el cual es una representación visual de los valores de altura con respecto al nivel medio del mar, caracterizando las formas de relieve del terreno. (INEGI, 2009)

De esta manera fue posible realizar el correspondiente MDE para la ciudad de Barranquilla (Figura 9-3) teniendo las elevaciones de la ciudad, siendo posible estimar las pendientes medias de cada una de las cuencas de estudio

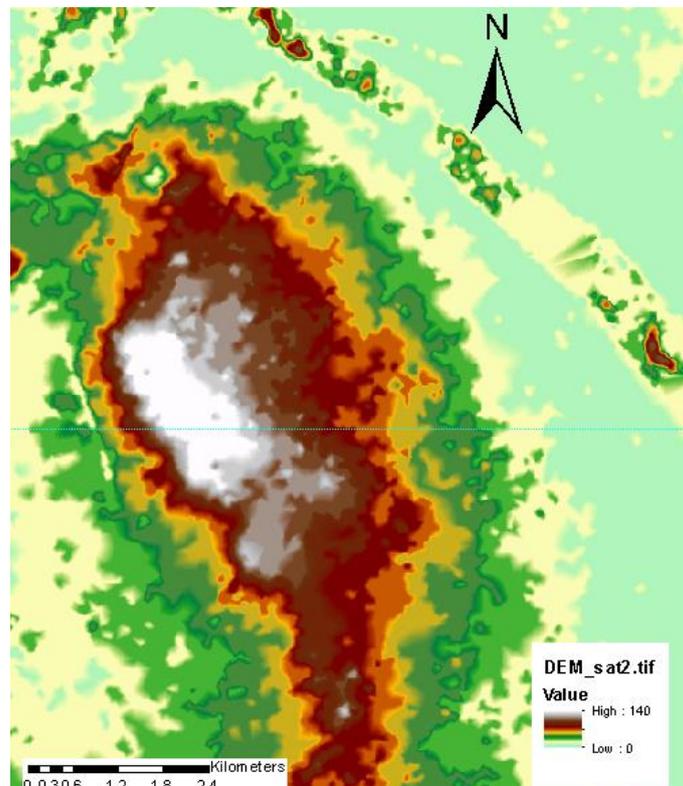


Figura 9-3. Modelo de elevación digital Barranquilla

9.2.1 Pendientes cuenca Torcoroma

Para la definición de pendiente de la cuenca Torcoroma, se definió únicamente el modelo de elevación de la cuenca. En ella se tomaron diferentes secciones donde se ubicaron las elevaciones máximas y mínimas, obteniendo la pendiente media mediante la diferencia de estas y la longitud de la sección. Este procedimiento fue repetido para cada subcuenca donde se estimó un promedio de todas las secciones realizadas. A partir de ello se obtuvieron los siguientes resultados en cuanto a la pendiente de cada una de las 18 subcuencas de la cuenca Torcoroma.

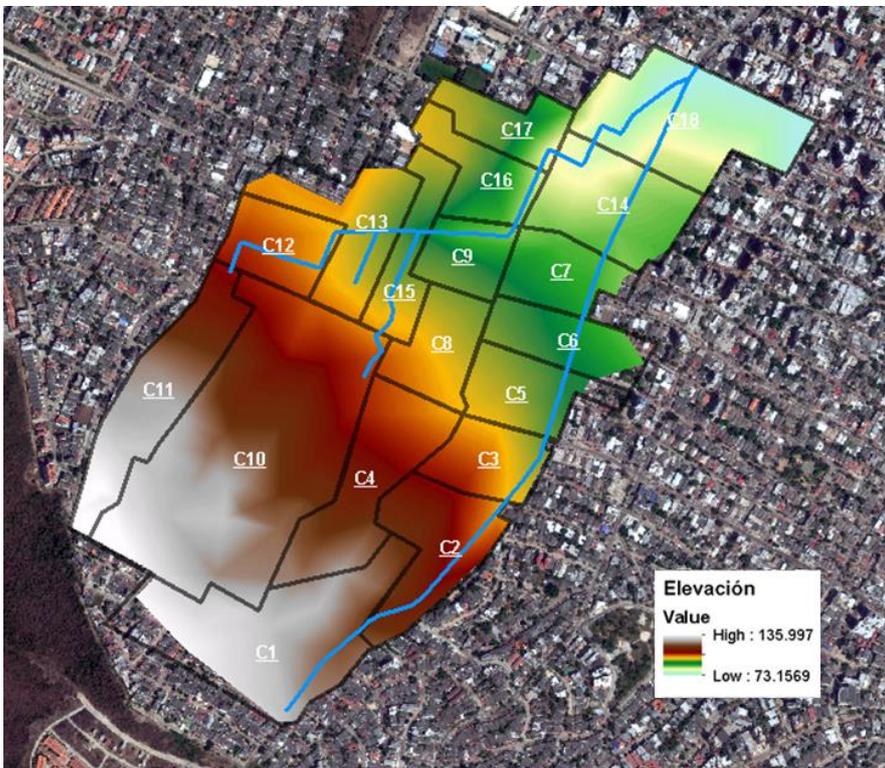


Figura 9-4. DEM cuenca Torcoroma

Tabla 9-3. Pendientes subcuencas Torcoroma

Nombre	Pendiente (%)
C1	2.6
C2	3.3
C3	3.9
C4	3.6
C5	3.1
C6	2.0
C7	2.6
C8	2.7
C9	3.6
C10	3.9
C11	3.6
C12	2.6
C13	1.5
C14	2.0
C15	4.1
C16	2.7
C17	1.8
C18	3.2

9.2.2 Pendientes cuenca Felicidad

El mismo procedimiento fue llevado a cabo para determinar las pendientes de las subcuencas de la cuenca Felicidad. La Tabla 9-4 muestra los resultados obtenidos a partir del procedimiento para la definición de pendiente de cada subcuenca

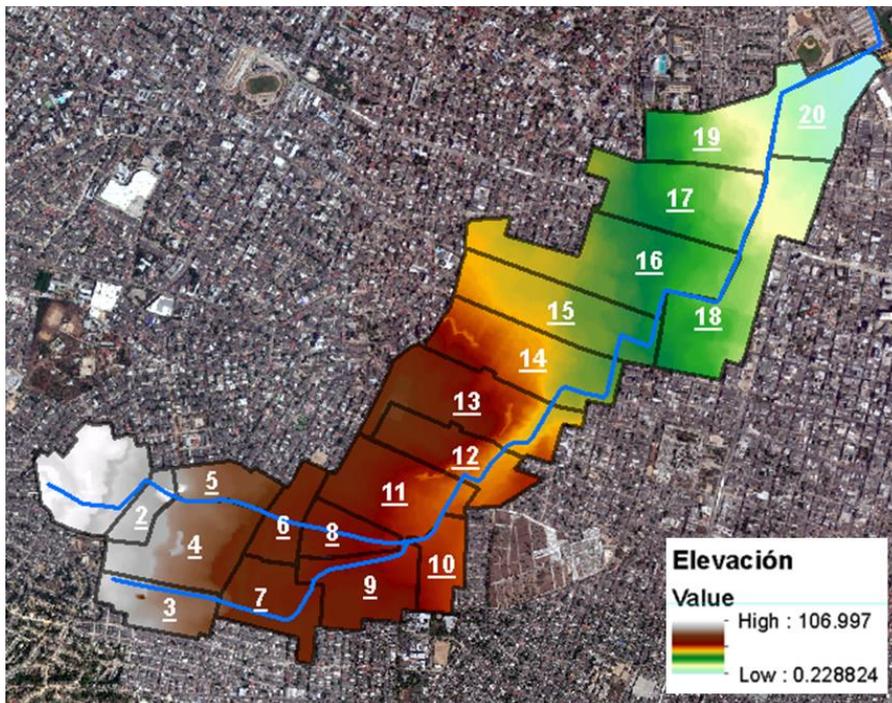


Figura 9-5. DEM cuenca Felicidad

Tabla 9-4. Pendiente subcuencas Felicidad

Cuenca	Pendiente %
1	3.5
2	2.2
3	2.5
4	2.6
5	2.5
6	2.2
7	1.8
8	2.4
9	2.0
10	1.4
11	2.0
12	1.3
13	3.8
14	2.1
15	1.9
16	1.9
17	2.4
18	1.4
19	2.6
20	1.7

9.3 Definición áreas permeables

La definición de los porcentajes de áreas permeables e impermeables es otro de las variables que afectan el tiempo de concentración de una cuenca. Para cuencas con mayores porcentajes permeables se esperará un mayor tiempo de concentración a aquella que tenga un menor porcentaje permeable.

De esta manera el análisis de estimación de áreas permeables en las cuencas de estudio se realizará a través de imágenes satelitales de la ciudad de Barranquilla tomadas para el año 2011.

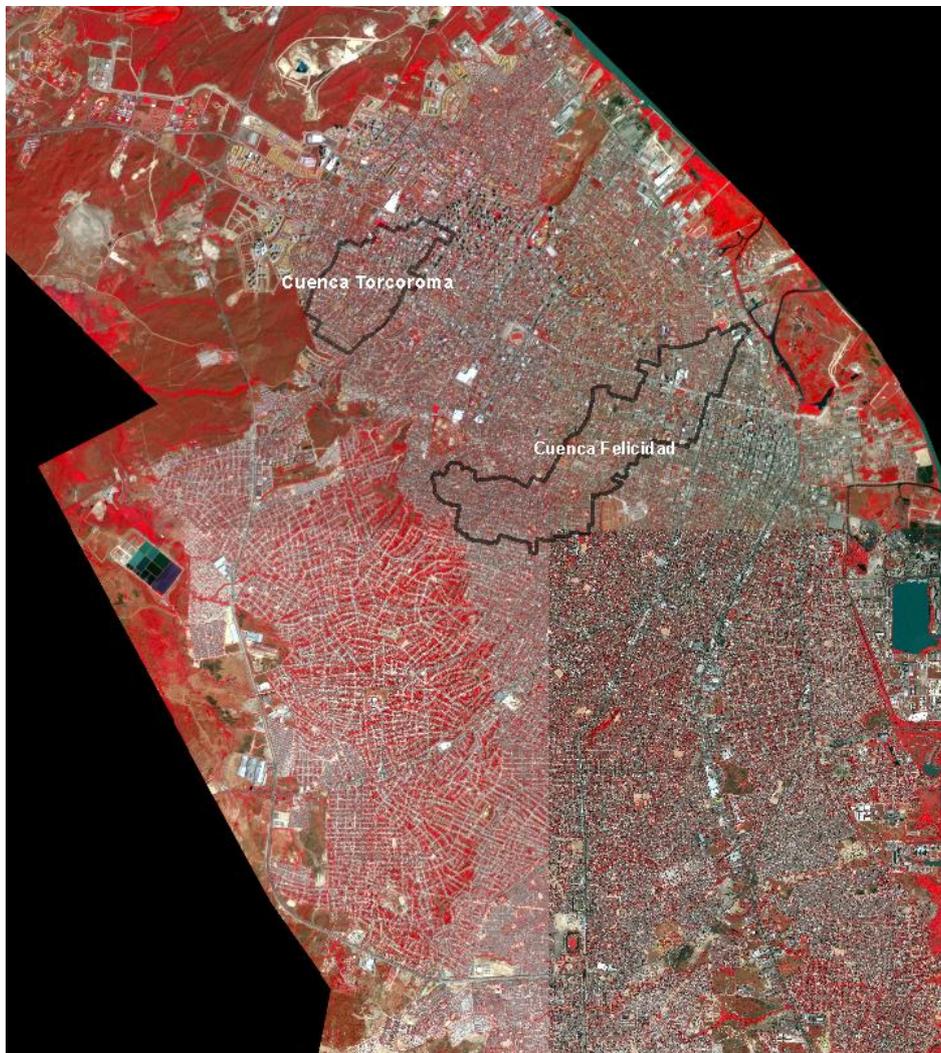


Figura 9-6. Imagen satelital con cobertura vegetal de Barranquilla

Para la imagen satelital obtenida (Figura 9-6), se realizó la combinación de bandas correspondientes de tal forma que se pudiese observar la cobertura vegetal de la ciudad. La Figura 9-6 muestra la cobertura vegetal de la ciudad de Barranquilla con color rojo. De esta

manera fue posible reconocer el área de áreas verdes correspondiente a cada una de las manzanas de estudio tales como la cuenca Torcoroma y Felicidad.

Sin embargo, estudios realizados por Ávila y Díaz (Díaz, 2014) en los cuales se hizo una revisión de las zonas verdes en una de las cuencas de la ciudad (Calle 93) se llegó a la conclusión de que son efectivamente permeables y permiten una retención e infiltración de la escorrentía. En este análisis se mostraron los porcentajes proyectados de zonas verdes para un área específica en imágenes satelitales, y pueden verse el porcentaje de área reducida debido a que no toda la cobertura vegetal proyectada permite la retención de agua en la superficie

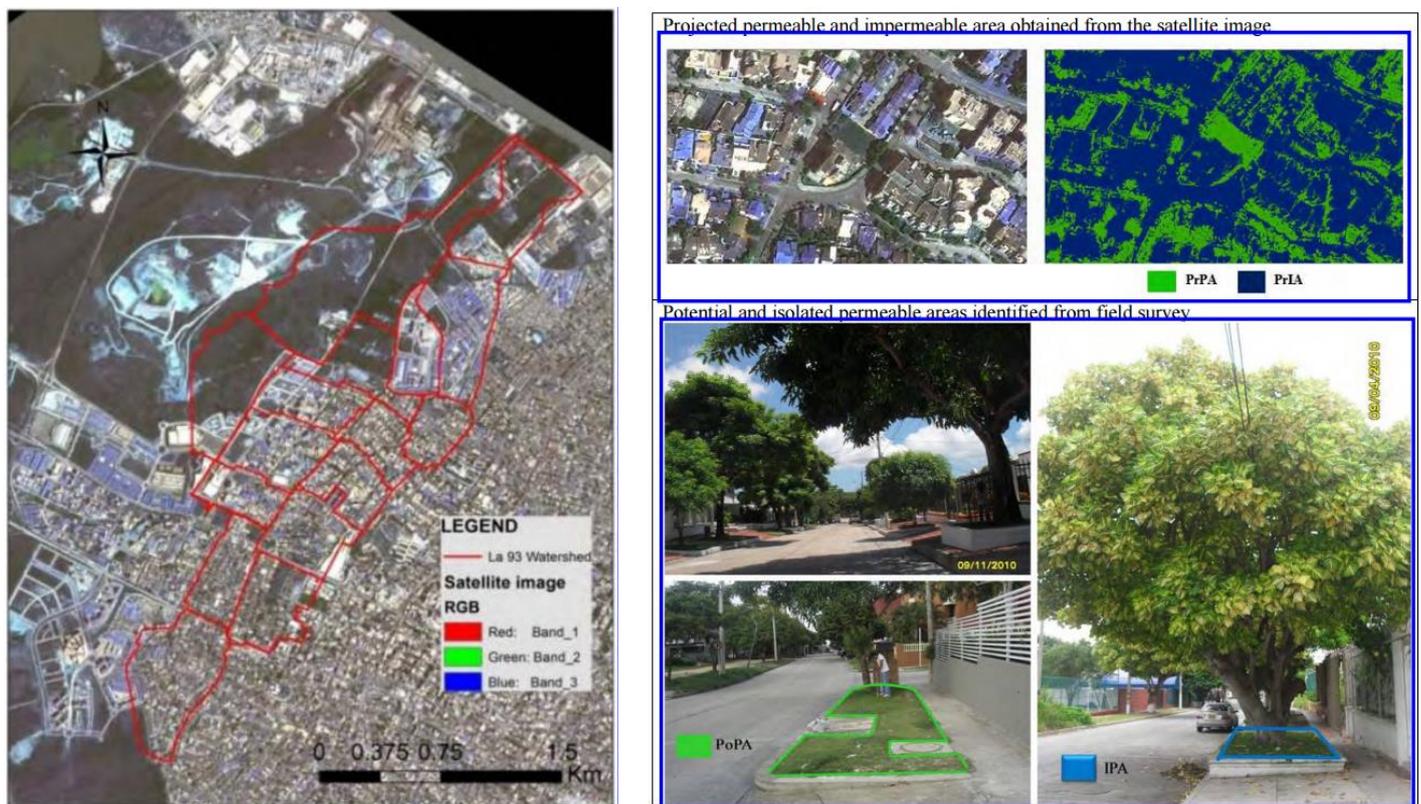


Figura 9-7. Comparación de porcentajes permeables en imágenes satelitales y revisión en campo. (Díaz, 2014)

Como caso de aplicación se tiene la Figura 9-8 donde se muestra que si se obtiene un área proyectada a partir de imágenes satelitales, puede obtenerse una alta cobertura vegetal dada por el follaje de un árbol (PrPa) el cual se encuentra confinado en su superficie por bordillos, impidiendo la entrada de escorrentía y su posterior infiltración. De esta manera el área efectiva permeable estará dada únicamente por lo que caiga de precipitación sobre el área verde bajo el árbol (PoPA)

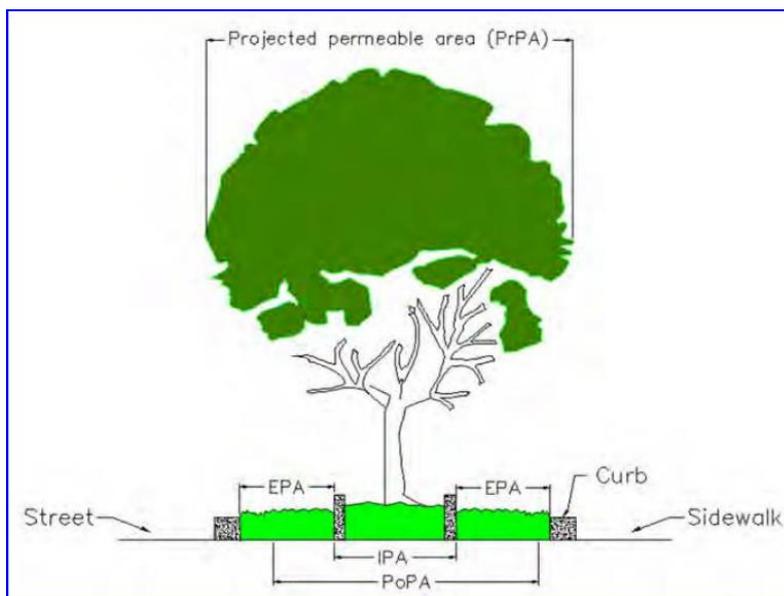


Figura 9-8. Área proyectada de zonas permeables y áreas efectivas. (Díaz, 2014)

Dentro de los resultados obtenidos en esta investigación para una cuenca al norte de la ciudad (La 93) la cual tiene un área de 396 Ha, se encontró un porcentaje de área permeable equivalente al 52 %, el cual fue reducido en un 25 % a través de reconocimiento en campo, donde se midió realmente el área permeable efectiva. Bajo esto se puede obtener la relación que indica que para cada hectárea proyectada de área verde se debe reducir en un 0.05 el porcentaje de área permeable.

Tabla 9-5. Estimación de áreas permeables proyectadas. (Díaz, 2014)

Tipo de Área	Porcentaje %
Área permeable proyectada	52
Área impermeable proyectada	48
Área permeable efectiva	27
Área impermeable efectiva	73

9.3.1 Zonas permeables cuenca Torcoroma

Tal como se mostró en la Figura 9-6 el ajuste de bandas fue realizado para poder obtener una visualización de la cobertura vegetal de la ciudad de Barranquilla. Para este caso se extrajo la cobertura vegetal proyectada únicamente para la cuenca Torcoroma

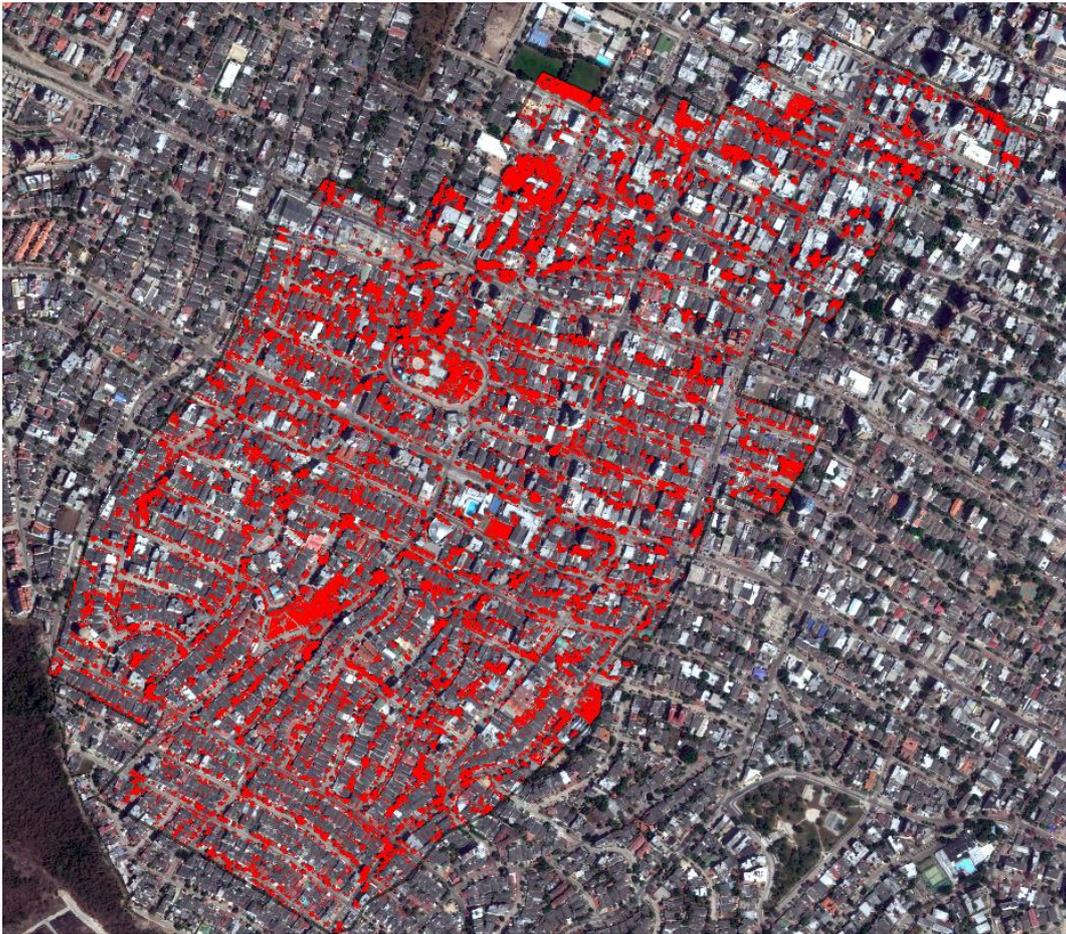


Figura 9-9. Áreas permeables proyectadas cuenca Torcoroma.

Una vez obtenida las áreas permeables e impermeables proyectadas con su respectivo porcentaje, se realizó el ajuste obtenido por Díaz y Ávila. 2014 descrito anteriormente para estimar el porcentaje de área permeable efectivo.

Tabla 9-6. Porcentajes permeables e impermeables proyectadas cuenca Torcoroma

Nombre	Área (Ha)	Área Permeable (m2)	Área Impermeable (m2)	% Permeable	% Impermeable
C1	15	26836	125734	18%	82%
C2	7	18265	56705	24%	76%
C3	4	10747	33824	24%	76%
C4	9	19485	70428	22%	78%
C5	5	11013	40801	21%	79%
C6	5	10392	39690	21%	79%
C7	5	6949	39607	15%	85%
C8	5	10500	38046	22%	78%
C9	4	6986	29875	19%	81%
C10	30	63636	237592	21%	79%
C11	9	18529	73678	20%	80%
C12	5	12658	35328	26%	74%
C13	7	19620	55222	26%	74%
C14	4	6854	36621	16%	84%
C15	5	22235	25015	47%	53%
C16	8	30665	52111	37%	63%
C17	4	17823	21643	45%	55%
C18	11	19644	94766	17%	83%

Tabla 9-7. Porcentajes permeables e impermeables efectivos cuenca Torcoroma

Nombre	Área	% Permeable	% Impermeable	Reduc % Permeable	% Permeable efectivo	% Impermeable efectivo
C1	15	18	82	0.95	17	83
C2	7	24	76	0.44	24	76
C3	4	24	76	0.25	24	76
C4	9	22	78	0.57	21	79
C5	5	21	79	0.32	21	79
C6	5	21	79	0.32	21	79
C7	5	15	85	0.32	15	85
C8	5	22	78	0.32	22	78
C9	4	19	81	0.25	19	81
C10	30	21	79	1.89	19	81
C11	9	20	80	0.57	19	81
C12	5	26	74	0.32	26	74
C13	7	26	74	0.44	26	74
C14	4	16	84	0.25	16	84
C15	5	47	53	0.32	47	53
C16	8	37	63	0.51	36	64
C17	4	45	55	0.25	45	55
C18	11	17	83	0.69	16	84

9.3.2 Zonas permeables cuenca Felicidad

En la cuenca Felicidad se llevó el mismo procedimiento evaluando los porcentajes de áreas permeables respecto al área total de cada una de las subcuencas definidas anteriormente. Para los resultados obtenidos en las áreas proyectadas, se realizó el correspondiente ajuste de reducción buscando obtener una estimación del área efectivamente permeable. Los resultados se muestran en las Tabla 9-8 y Tabla 9-9



Figura 9-10. Áreas permeables proyectadas cuenca Felicidad

Nombre	Área (Ha)	Área Impermeable		% Permeable	% Impermeable
		Área Permeable (m2)	(m2)		
1	19	34061	154526	18	82
2	5	9134	43044	18	82
3	8	18348	59814	23	77
4	20	38057	163027	19	81
5	8	18028	66124	21	79
6	11	17273	90679	16	84
7	13	31993	102788	24	76
8	8	21670	58483	27	73
9	15	29759	124254	19	81
10	8	20495	61142	25	75
11	20	53753	142347	27	73
12	15	30343	124180	20	80
13	25	61871	186133	25	75
14	24	41486	193709	18	82
15	22	33225	191124	15	85
16	30	49997	250634	17	83
17	29	33796	255843	12	88
18	24	39230	199192	16	84
19	18	25462	150082	15	85
20	15	16704	129432	11	89

Tabla 9-8. Porcentajes permeables e impermeables proyectadas cuenca Felicidad

Tabla 9-9. Porcentajes permeables e impermeables efectivos cuenca Felicidad

Nombre	Área	% Permeable	% Impermeable	Reduc % Permeable	% Permeable efectivo	% Impermeable efectivo
1	19	18	82	1.20	17	83
2	5	18	82	0.32	18	82
3	8	23	77	0.51	22	78
4	20	19	81	1.26	18	82
5	8	21	79	0.51	20	80
6	11	16	84	0.69	15	85
7	13	24	76	0.82	23	77
8	8	27	73	0.51	26	74
9	15	19	81	0.95	18	82
10	8	25	75	0.51	24	76
11	20	27	73	1.26	26	74
12	15	20	80	0.95	19	81
13	25	25	75	1.58	23	77
14	24	18	82	1.52	16	84
15	22	15	85	1.39	14	86
16	30	17	83	1.89	15	85
17	29	12	88	1.83	10	90
18	24	16	84	1.52	14	86
19	18	15	85	1.14	14	86
20	15	11	89	0.95	10	90

9.4 Red de monitoreo “Pluvial.co”

Una vez definida cada una de las cuencas, se debe tener en ésta la distribución espacial de un evento de lluvia. Dado que las lluvias en Barranquilla se presentan en sectores específicos, las intensidades y alturas de lluvia pueden variar dentro de una misma cuenca. Es por ello que se debe tener información en cada uno de los sectores de la ciudad, la cual fue adquirida a través de una red de monitoreo de lluvia desarrollada por la Universidad del Norte.

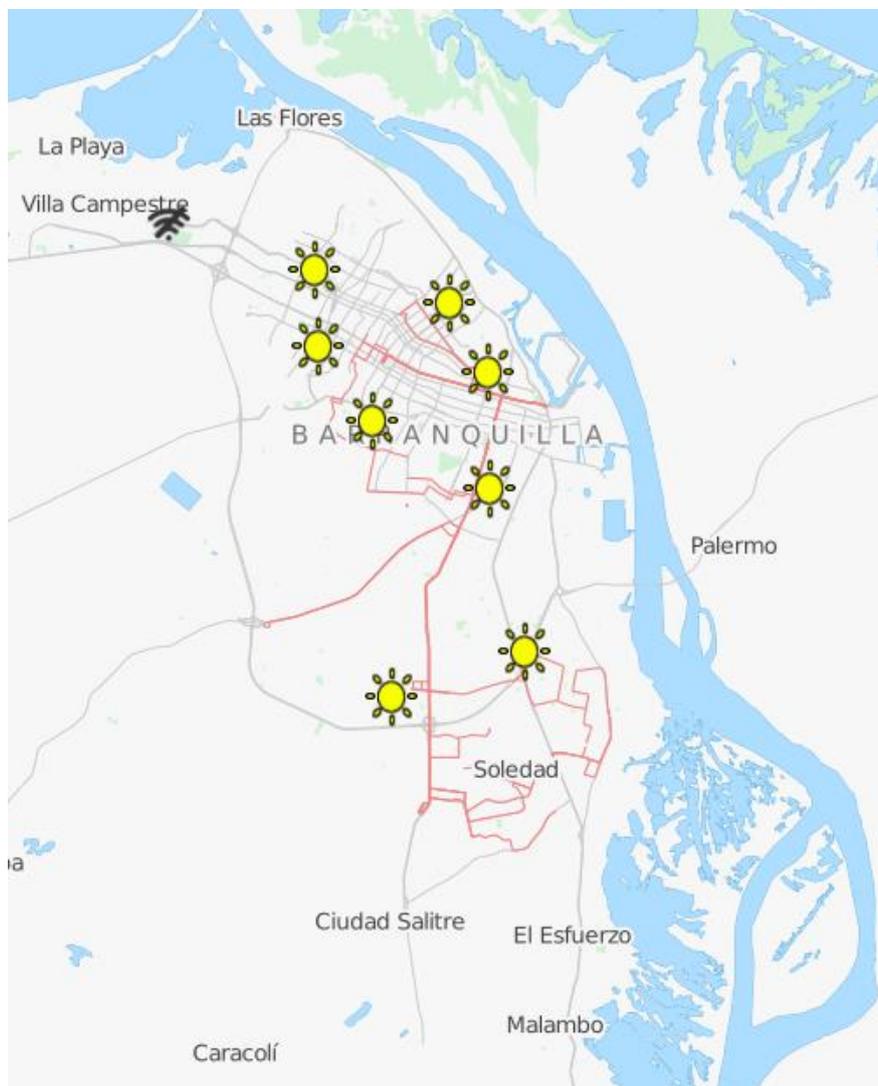
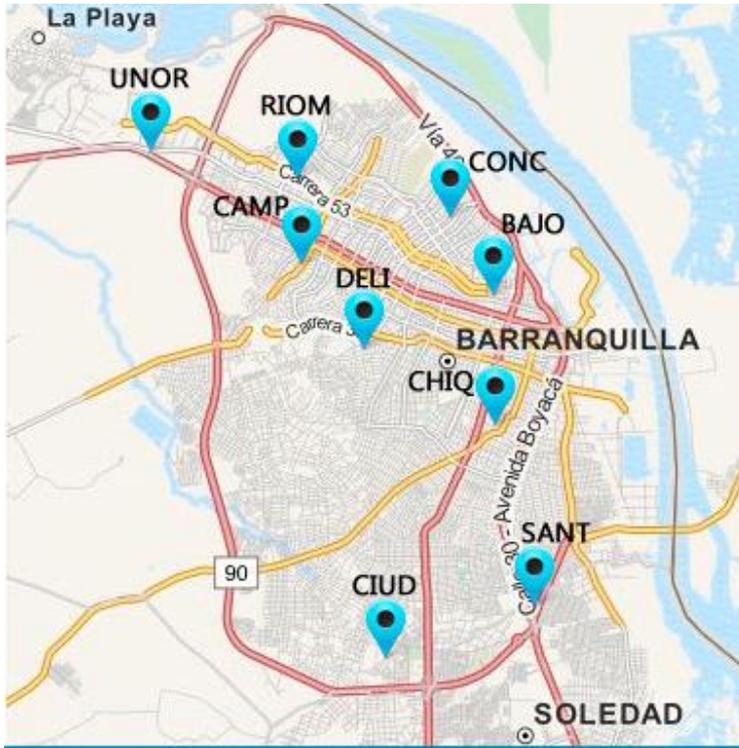


Figura 9-11. Red de monitoreo Pluvial

La red de monitoreo (Pluvial) está compuesta por 9 pluviómetros abarcando más del 90% de la ciudad de Barranquilla. Esta plataforma permite a los usuarios obtener información en tiempo real en las zonas donde se registre precipitación.



Código	Estación
BAJO	Barrio Abajo
CHIQ	Chiquinquirá
CIUD	Ciudadela
DELI	Delicias
CAMP	La Campiña
CONC	La Concepción
RIOM	Riomar
SANT	Santa Helena
UNOR	Uninorte

Figura 9-12. Pluviómetros red de monitoreo Pluvial

Dentro de la red de monitoreo pluvial, se pueden generar áreas para que permitan efectuar una estimación de la distribución espacial en las lluvias de la ciudad. Bajo este enfoque, se desarrollaron polígonos de Thiessen para la red pluviométrica determinando las áreas aferentes para cada cuenta. La Figura 9-13 muestra los polígonos de Thiessen aplicados sobre la ciudad, permitiendo conocer la distribución espacial de las lluvias.



Figura 9-13. Polígonos de Thiessen para pluviómetros red de monitoreo Pluvial

Tal como se muestra en la Figura 9-13, los polígonos de Thiessen dan una mayor precisión en cuanto a la distribución espacial que puede tenerse en un mismo evento de lluvia. Bajo estas circunstancias se puede presentar que para una misma cuenca exista una alta precipitación en la parte alta, mientras en la parte baja no se registre lluvias.

Dentro de las cuencas de estudio, la cuenca Torcoroma se encuentra en su totalidad incluida dentro del polígono de Thiessen del pluviómetro “La Campiña” (P3), por lo tanto el registro de lluvia obtenido para este pluviómetro caerá sobre la totalidad del área de la cuenca.

En la medida que la red de monitoreo se encuentre más instrumentada, la información espacial de las lluvias será más detallada y se puede obtener más información de precipitación para la cuenca Torcoroma.

Para el caso de la cuenca Felicidad cuya área duplica a Torcoroma, se identificaron 3 polígonos de Thiessen dentro de la divisoria de la cuenca. Estos polígonos vienen dados por los pluviómetros de Delicias (P5), Chiquinquirá (P7) y Bomberos (P9)

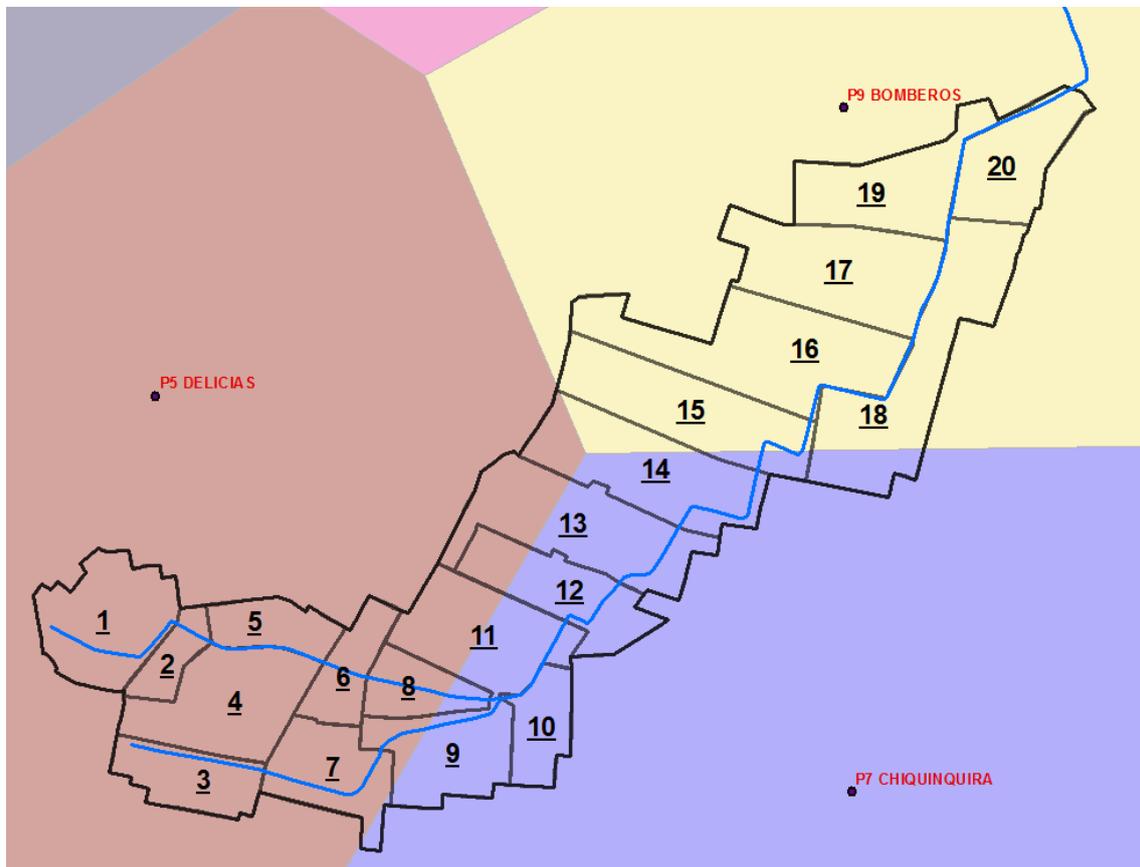


Figura 9-14. Polígonos de Thiessen cuenca Felicidad

A partir del área de los polígonos de Thiessen, se determinó el porcentaje de incidencia para cada subcuenca. Este porcentaje fue obtenido dividiendo el área incluyente de cada polígono sobre la subcuenca con el área total de esta. A continuación se muestran los resultados obtenidos de los porcentajes de incidencia para cada subcuenca.

Tabla 9-10. Porcentaje de área de polígonos de Thiessen en subcuencas Felicidad

CUENCA	DELICIAS (P5)	CHIQUINQUIRA (P7)	BOMBERO (P9)
1	100%	0%	0%
2	100%	0%	0%
3	100%	0%	0%
4	100%	0%	0%
5	100%	0%	0%
6	100%	0%	0%
7	94%	6%	0%
8	78%	22%	0%
9	22%	78%	0%
10	0%	100%	0%
11	50%	50%	0%
12	25%	75%	0%
13	38%	62%	0%
14	16%	63%	21%
15	0%	11%	89%
16	0%	0%	100%
17	0%	0%	100%
18	0%	23%	77%
19	0%	0%	100%
20	0%	0%	100%

A partir de la Tabla 9-10 , si se quisiera conocer la precipitación equivalente en una subcuenca, se aplicaría la siguiente ecuación.

$$P_{\text{efectiva}} (\text{mm}) = (\% P5 * \text{Precipitación } P5) + (\% P7 * \text{Precipitación } P7) + (\% P9 * \text{Precipitación } P9)$$

Aplicando está ecuación se podrá definir un hietograma diferente para cada subcuenca de Felicidad, con lo cual se podrá simular las características espaciales de una lluvia real, considerando que esta no se distribuye de manera constante sobre toda la cuenca si no que variará significativamente a lo largo del área de drenaje.

10 Topografía de cauces

Así como se determinaron los parámetros hidrológicos de cada una de las subcuencas de estudio, es necesario conocer las condiciones topográficas de cada uno de los cauces. Esta información fue adquirida a partir de levantamientos topográficos en cada una de las calles por donde fluyen los arroyos de estudio, determinando así la elevación las pendientes medias. La pendiente del cauce es un factor determinante ya que ella depende la velocidad y profundidad en el flujo, el cual es lo que se buscará determinar.

Tabla 10-1. Información topográfica cauce Torocroma

Longitud máxima (Km)	Elevación máxima (m)	Elevación mínima (m)	Pendiente media %
1.6	122	76.5	3%

Tabla 10-2. Información topográfica cauce Felicidad

Longitud máxima (Km)	Elevación máxima (m)	Elevación mínima (m)	Pendiente media %
4.8	83.04	1.59	2%

11 Montaje de Modelo

El montaje del modelo fue elaborado con el software PCSWMM el cual es una herramienta que permite hacer modelos hidráulicos e hidrológicos en 1 o 2 dimensiones. Bajo este modelo se obtuvieron los resultados de las variables hidráulicas de interés para la implementación del sistema de alerta temprana en el cual se definen los niveles de peligrosidad en función de estas. Para este modelo se requieren definir variables hidrológicas de entrada previamente calculadas a partir de información satelital e información en campo, tal como lo fue la topografía de cada una de las calles sobre el eje de los arroyos.

11.1 Modelo Torcoroma

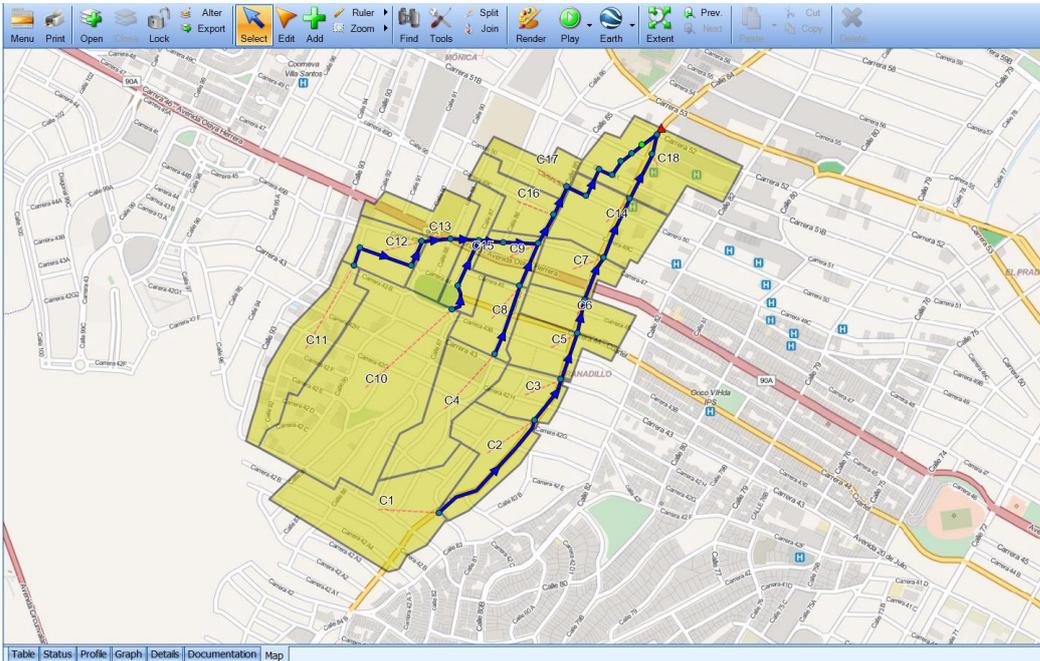


Figura 11-1. Modelo cuenca Torcoroma. PCSWMM

11.2 Modelo Felicidad

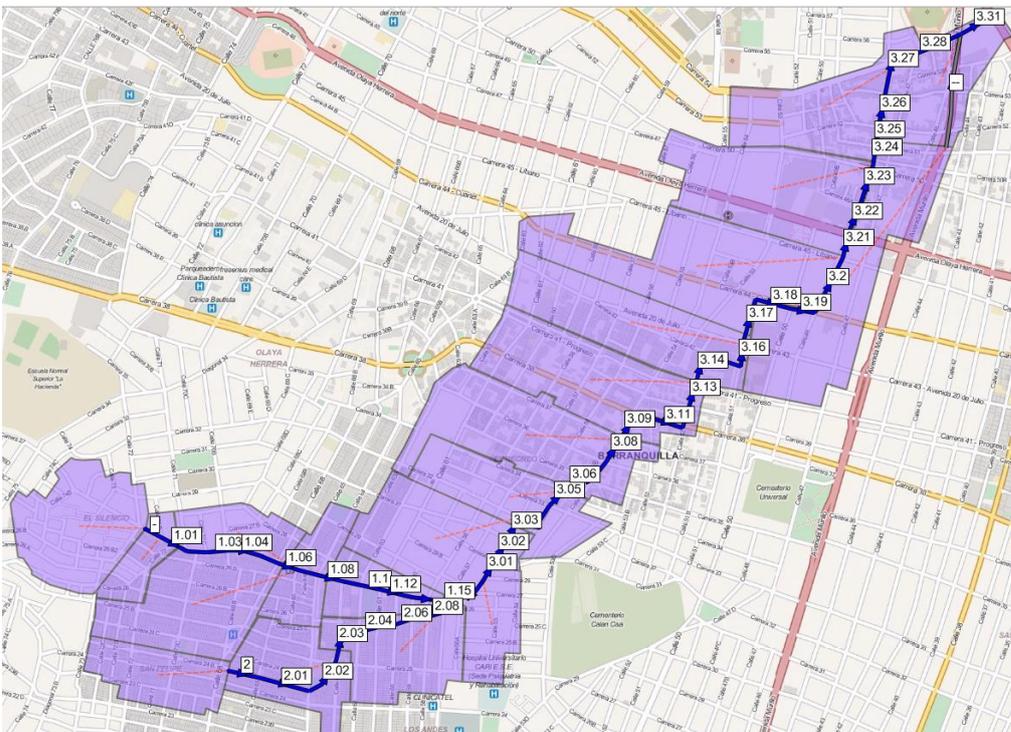


Figura 11-2. Modelo cuenca Felicidad. PCSWMM

En el modelo de la cuenca Felicidad, cada calle fue identificada con un ID, Permitiendo representar cada una de las calles La Tabla 11-1 muestra el correspondiente ID para cada calle con su respectiva dirección

Tabla 11-1. Identificación de calles en modelo cuenca Felicidad

ID Conducto	Dirección Vía	ID Conducto	Dirección Vía
1.01	'Carrera 27-Calle 71'	3.04	'Calle 55 - Carrera 32'
1.02	'Carrera 27-Calle 70C'	3.05	'Calle 55 - Carrera 33'
1.03	'Carrera 27-Calle 70B'	3.06	'Calle 55 - Carrera 34'
1.04	'Carrera 27 - Calle 68B'	3.07	'Calle 54 - Carrera 35'
1.05	'Carrera 27 - Calle 68'	3.08	'Calle 54 - Carrera 36'
1.06	'Carrera 27 - Calle 65'	3.09	'Calle 54 - Carrera 37'
1.07	'Carrera 27 - Calle 64'	3.1	'Carrera 38 - Calle 53'
1.08	'Carrera 27 - Calle 63B'	3.11	'Carrera 38 - Calle 52'
1.09	'Carrera 27 - Calle 63'	3.12	'Calle 52 - Carrera 38'
1.1	'Carrera 27 - Calle 61'	3.13	'Calle 52 -Carrera 39'
1.12	'Carrera 27 - Calle 60'	3.14	'Calle 52 - Carrera 41'
1.13	'Carrera 27 - Calle 59'	3.15	'Carrera 42 - Calle 51'
1.14	'Carrera 27 - Calle 58'	3.16	'Calle 51 - Carrera 42'
1.15	'Carrera 27 - Calle 57'	3.17	'Calle 51 - Carrera 43'
2	'Carrera 24B - Calle 65'	3.18	'Carrera 44 - Calle 50'
2.01	'Carrera 24B - Calle 64'	3.19	'Carrera 44 - Calle 48'
2.02	'Calle 63C - Carrera 24'	3.2	'Calle 48 - Carrera 44'
2.03	'Calle 63C - Carrera 25B'	3.21	'Calle 48 - Carrera 45'
2.04	'Carrera 25 B - Calle 61'	3.22	'Calle 48 - Carrera 46 (Canalizado)'
2.05	'Carrera 25B - Calle 60'	3.23	'Calle 48 - Carrera 46A (Canalizado)'
2.06	'Carrera 25B - Calle 59'	3.24	'Calle 48 - Carrera 50B (Canalizado)'
2.07	'Carrera 25B - Calle 58'	3.25	'Calle 48 - Carrera 51 (Canalizado)'
2.08	'Carrera 25B - Calle 57'	3.26	'Calle 48 - Carrera 52 (Canalizado)'
2.09	'Calle 57 - Carrera 27'	3.27	'Carrera 54 - Calle 47 (Canalizado)'
3	'Calle 56-Carrera 27'	3.28	'Carrera 54 - Calle 46B (Canalizado)'
3.01	'Calle 56 - Carrera 29'	3.3	'Carrera 54 - Av. Murillo (Canalizado)'
3.02	'Calle 56 - Carrera 30 '	3.31	'Carrera 54 - Vía 40 (Canalizado)'
3.03	'Calle 56 - Carrera 31'		

12 Calibración cuenca Torcoroma

El proceso de calibración es necesario para poder determinar de manera acertada los tiempos de respuesta de la cuenca en estudio, así como los caudales picos presentes para cada evento de lluvia. Actualmente no se han elaborado procesos de calibración en los principales arroyos de la ciudad dado que no existe registro histórico de precipitación, ni caudales en las descargas, por lo que se han ejecutado diversas estimaciones a partir de métodos hidrológicos desarrollados en otras partes del mundo.

La calibración para las cuencas de la ciudad se basará en tomar información de precipitación y caudales en la salida de una cuenca instrumentada como lo es la cuenca Torcoroma, buscando extraer las características de fácil medición tales como área, longitud de la cuenca, pendiente y porcentajes de permeabilidad. El proceso de calibración será orientando hacia las variables que tienen una alta sensibilidad en cuanto a la variación de Hidrograma de salida y son de difícil medición, como la rugosidad.

La Figura 12-1 muestra la ubicación de los equipos de medición, el pluviómetro P3 (Campiña) de la red de monitoreo "Pluvial" y el sensor de nivel y velocidad ubicado en la salida de la cuenca. Dentro de los registros obtenidos para la calibración se contó con 4 eventos de lluvia presentados en el año 2014 entre los meses de Agosto y Septiembre. La precipitación registrada para estos 4 eventos se presenta en la Tabla 12-4



Figura 12-1. Ubicación de equipos para calibración

Tabla 12-1. Registro de lluvia para calibración

Evento	Fecha	Precipitación (mm)
1	23 Agosto	32.51
2	28 Agosto	21.84
3	3 Septiembre	28.95
4	7 Septiembre	17.52

La Figura 12-2 muestra los hietogramas correspondiente a los cuatros eventos registrados, donde se detalla la distribución temporal de cada una de las tormentas usadas para la calibración. Estas lluvias se presentaron en lapsos promedios de 1 hora con intensidades máximas de 46 mm/h en el 28 de Agosto.

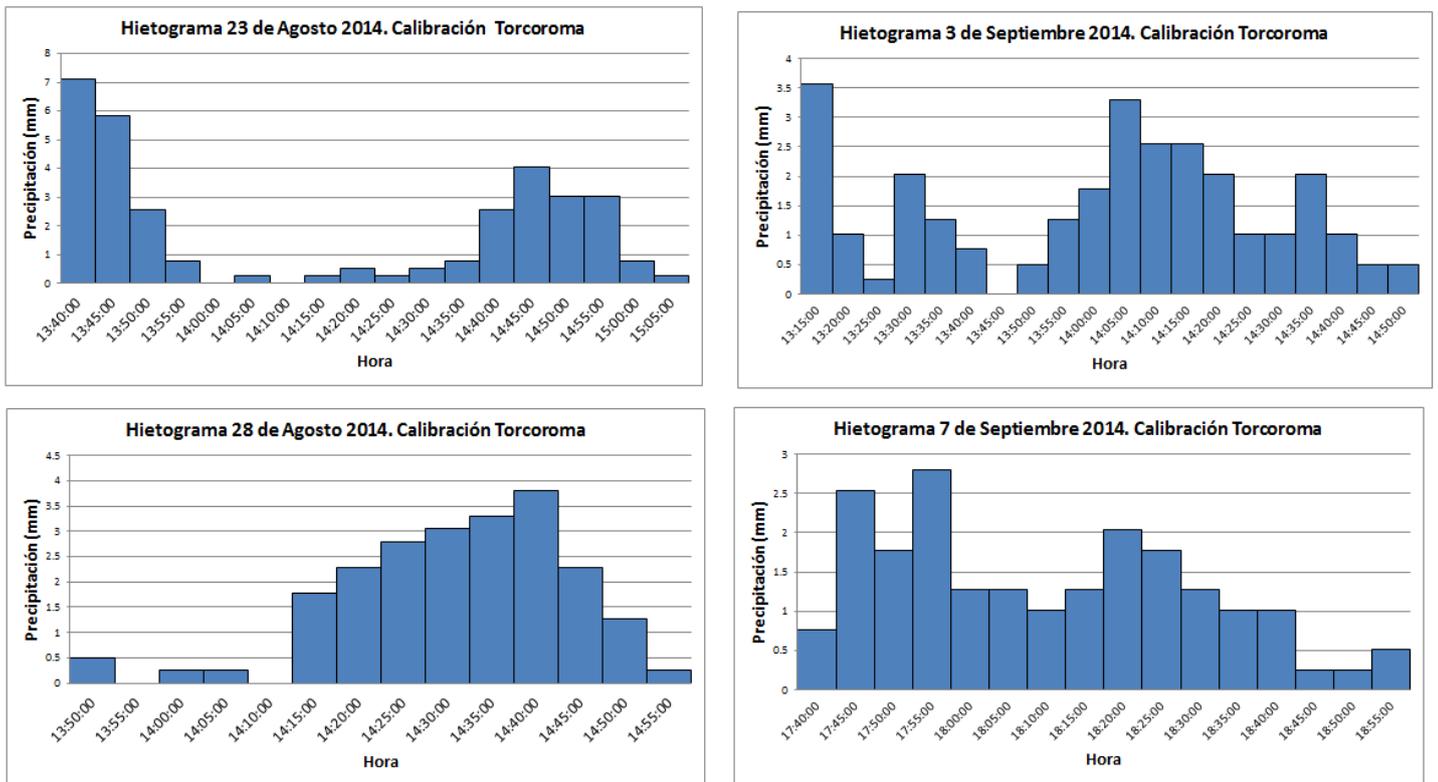


Figura 12-2. Hietogramas registrados para calibración de modelo

Como se mencionó anteriormente, la base de la calibración consistirá en determinar las rugosidades de las subcuencas que generen un mejor ajuste a cada una de las tormentas analizadas. Para ello se calcularon variables geomorfológicas e hidrológicas de fácil medición que permitiesen caracterizar cada una de las subcuencas y así obtener respuestas en los hidrogramas de salida de manera más precisa. Dentro de las variables calculadas a partir de imágenes satelitales se tiene el área, pendiente, longitud de la cuenca y porcentaje de permeabilidad; estas variables se presentan a continuación en la Tabla 12-2

Tabla 12-2. Variables hidrológicas subcuencas Torcoroma para calibración

Cuenca	Área (Ha)	Longitud (m)	Pendiente %	Permeabilidad %
C1	15.3	557	2.61	17
C2	7.5	470	3.33	22
C3	4.5	200	3.9	22
C4	9.0	550	3.92	20
C5	5.2	175	3.12	20
C6	5.0	127	2	20
C7	4.7	172	2.6	15
C8	4.9	266	2.7	22
C9	3.7	180	3.6	19
C10	30.1	780	3.96	19
C11	9.2	756	3.65	19
C12	4.8	250	2.6	25
C13	7.5	350	1.5	25
C14	8.3	244	2.7	16
C15	4.3	450	2	36
C16	4.7	340	4.1	35
C17	3.9	332	1.8	32
C18	11.4	270	3.4	16

Por otra parte, se definió dentro del modelo de infiltración el método de Horton el cual tiene en cuenta el efecto de amortiguamiento en los hidrogramas para cuencas de iguales características pero con porcentajes de permeabilidad distintos; es decir que para una cuenca más impermeable se esperará menores tiempos de concentración y mayores caudales picos que una cuenca más permeable.

De esta manera se ajustaron las rugosidades dadas por el n de Manning, tanto para las áreas permeables como impermeables de una misma subcuenca. A partir de un procedimiento de ensayo y error, donde se buscaba obtener el mejor ajuste para los cuatro eventos, se tomó un n de Manning para zonas impermeables de 0.01 y N de Manning para zonas permeables de 0.02

Tabla 12-3. Rugosidades de Manning. (Posey, 1941)

Cunetas y canales sin revestir	
En tierra ordinaria, superficie uniforme y lisa	0,020-0,025
En tierra ordinaria, superficie irregular	0,025-0,035
En tierra con ligera vegetación	0,035-0,045
En tierra con vegetación espesa	0,040-0,050
En tierra excavada mecánicamente	0,028-0,033
En roca, superficie uniforme y lisa	0,030-0,035
En roca, superficie con aristas e irregularidades	0,035-0,045
Cunetas y Canales revestidos	
Hormigón	0,013-0,017
Hormigón revestido con gunita	0,016-0,022
Encachado	0,020-0,030
Paredes de hormigón, fondo de grava	0,017-0,020
Paredes encachadas, fondo de grava	0,023-0,033
Revestimiento bituminoso	0,013-0,016
Corrientes Naturales	
Limpias, orillas rectas, fondo uniforme, altura de lámina de agua suficiente	0,027-0,033
Limpias, orillas rectas, fondo uniforme, altura de lámina de agua suficiente, algo de vegetación	0,033-0,040
Limpias, meandros, embalses y remolinos de poca importancia	0,035-0,050
Lentas, con embalses profundos y canales ramificados	0,060-0,080
Lentas, con embalses profundos y canales ramificados, vegetación densa	0,100-0,200 ¹
Rugosas, corrientes en terreno rocoso de montaña	0,050-0,080
Áreas de inundación adyacentes al canal ordinario	0,030-0,200

Estos valores de rugosidades fueron comparados por diversas fuentes que muestran un n de Manning típico para diferentes tipos de suelo. La Tabla 12-3 muestra de estos valores típicos

con los cuales se puede comparar para el modelo la rugosidad de zonas impermeables con n de Manning para hormigón (0.013-0.017) y las rugosidades permeables con cunetas en corriente natural (0.027-0.033).

En cuanto a los ajustes obtenidos para los hidrogramas, se utilizaron los estadísticos del coeficiente de determinación (R^2) y mínimos cuadrados (LSE). Para cada uno de los eventos de lluvia, el modelo arroja los respectivos estadísticos mostrados en la Tabla 12-4

Tabla 12-4. Coeficiente de determinación para calibración de modelo

Fecha	R^2	LSE
23 Agosto	0.942	104
28 Agosto	0.90	105
3 Septiembre	0.90	142
7 Septiembre	0.89	46

Puede verse que en la tabla de ajustes el R^2 más bajo (7 de Septiembre) da un menor error cuadrático, esto debido a que el R^2 no tiene en cuenta el desfase que puede haber entre dos curvas aun cuando esta siga la misma tendencia. De esta forma se pueden obtener hidrogramas con un R^2 muy alto con error cuadrático mayor.

La Figura 12-3 muestra los 4 hidrogramas obtenidos con sus respectivos hidrogramas observados. Dentro del análisis gráfico en cada uno de los hidrogramas se consideraron los tiempos de arranque y descenso para cada hidrograma, permitiendo definir un mejor ajuste en los tiempos de concentración de cada subcuenca y así tener mejor estimación para la realización de un sistema de alerta temprana

Dentro de las posibles causas que no permitieron obtener un mejor ajuste entre los datos calculados y observados de los hidrogramas, se encuentran efectos climáticos en el cual los datos registrados por el pluviómetro usados para la modelación no corresponde con la totalidad de la lluvia generada en la cuenca; debe aclararse que para este caso se usó información de lluvia de un único punto para modelar los distintos eventos sobre toda la cuenca. De esta forma es posible que en zonas alejadas del pluviómetro, la precipitación haya sido mayor o menor, lo cual equivale a un error sistemático que no puede ser ajustado con los parámetros de la cuenca.

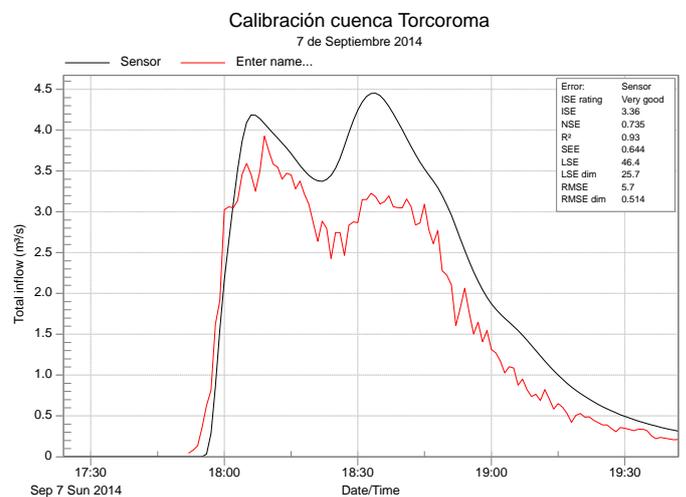
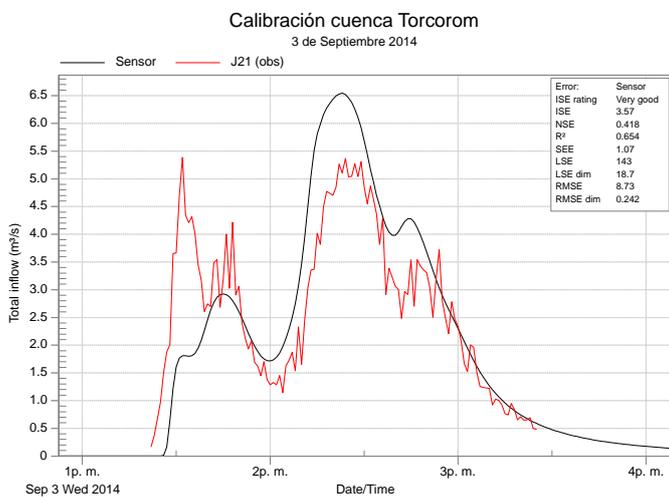
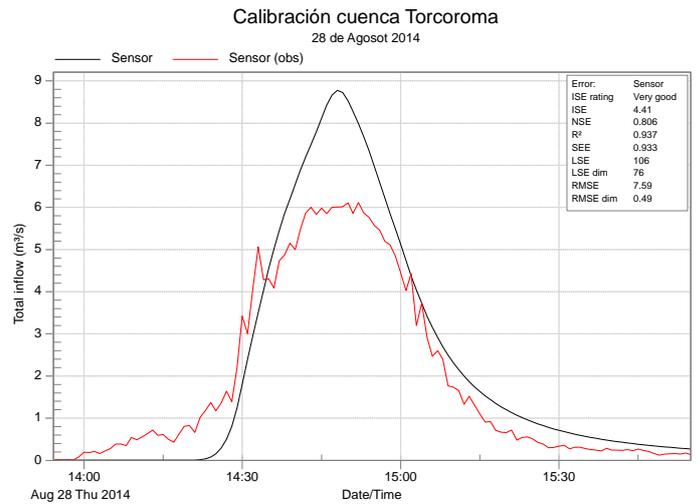
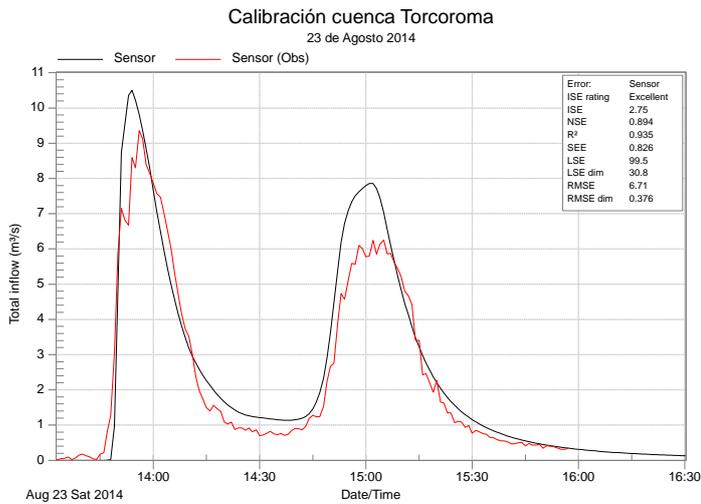


Figura 12-3. Hidrogramas calibrados cuenca Torcoroma.

13 Tiempo de concentración

El tiempo de concentración es una variable extensivamente usada en el diseño hidrológico para la determinación de la capacidad hidráulica en diferentes estructuras (Jorge Julián Vélez Upegui, 2010). Esta variable es propia de cada sector y depende de las características geomorfológicas de la cuenca. Se atribuye comúnmente que el tiempo de concentración es el tiempo equivalente que tarde una gota de agua caída desde el punto más alejado de la cuenca hasta el punto de descarga o concentración.

De forma gráfica, el área comprendida bajo un hidrograma corresponde al volumen de agua sobre el punto de interés (Roman, 2011).. Este hidrograma presentará un tiempo base T_b , y representa el tiempo que transcurre entre el momento en que llegan las componentes de la escorrentía generada por la lluvia hasta que éstas dejan de actuar.

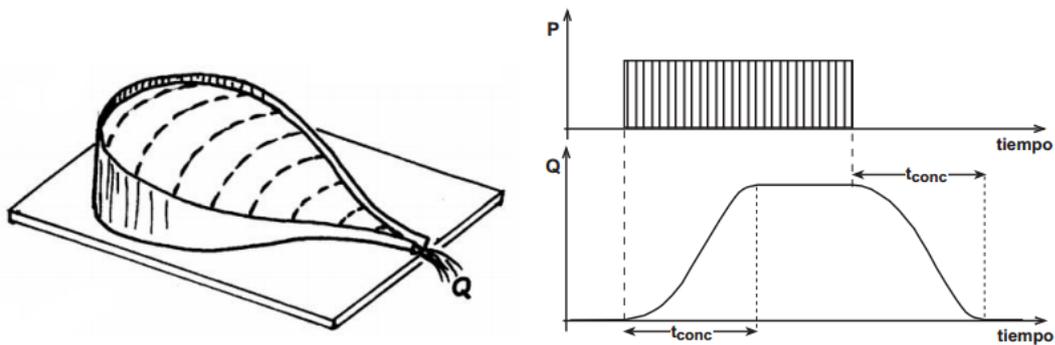


Figura 13-1. Tiempos característicos en un hidrograma para la estimación del tiempo de concentración. (Jorge Julián Vélez Upegui, 2010)

Para este caso, si se llegase a presentar una lluvia de intensidad constante y de suficiente duración, el hidrograma comenzará a subir gradualmente hasta alcanzar un caudal máximo el cual se mantendrá el tiempo que duró la tormenta.

13.1 Tiempo de concentración cuenca Torcoroma

Bajo esta metodología, se pudo determinar tiempo de concentración para cada subcuencas de Torcoroma, considerando un evento de lluvia lo suficientemente largo en el cual el caudal pico del hidrograma se mantenga constante. De esta manera se determinó el tiempo que transcurre hasta que el caudal se mantenga constante lo cual equivale al tiempo de concentración.

Como la intensidad de la tormenta no afecta el tiempo de concentración, para cualquier evento con una duración lo suficientemente amplia se podrá determinar esta variable hidrológica.

Inicialmente se calculó el tiempo de concentración para toda la cuenca Torcoroma, tomando como punto de referencia el nodo de descarga en el modelo hidrológico. Para este caso se obtuvo un tiempo de concentración de 38 minutos

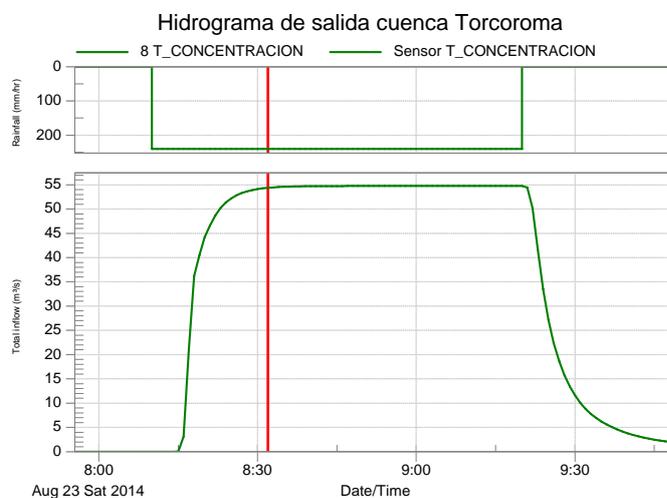


Figura 13-2. Hidrograma de salida cuenca Torcoroma. 28 Agosto 2014

Tabla 13-1. Tiempo de concentración cuenca Torcoroma.

Inicio Tormenta	8:10
Tiempo caudal estable	8:40
Tiempo Concentración	38 minutos

13.2 Tiempo de concentración cuenca Torcoroma

Para cada una de las subcuencas de Torcoroma, se aplicó el mismo método de cálculo del tiempo de concentración. Debe tenerse en cuenta que cada una de las subcuencas tiene los mismos valores de n-Manning dado que la calibración fue dada a partir del registro de caudales en la salida de la cuenca Torcoroma y no en cada una de las subcuencas. Por lo tanto el tiempo de concentración varía en cada una por las variables geomorfológicas definidas anteriormente tales como área, pendiente, longitud de la cuneca y el porcentaje de permeabilidad.

Tabla 13-2. Tiempo de concentración subcuencas Torcoroma

Cuenca	Tc (min)
C1	27
C2	20
C3	10
C4	24
C5	10
C6	15
C7	10
C8	20
C9	7
C10	34
C11	30
C12	19
C13	20
C14	14
C15	30
C16	14
C17	18
C18	14

13.3 Ajuste por regresión tiempo de concentración

Una vez determinados los tiempos de concentración promedio de cada una de las subcuencas de Torcoroma, se buscará definir una relación entre las variable geomorfológicas de cada subcuenca con el tiempo de concentración. Es decir que para cualquier cuenca urbana en la ciudad de Barranquilla en la cual se tenga información tales como el área, longitud, pendiente y porcentaje de permeabilidad, se pueda determinar el tiempo de concentración.

Tabla 13-3. Variables para ajuste en tiempo de concentración

Cuenca	Área (Ha)	Longitud (Km)	Pendiente %	Permeabilidad %	Tc (min)
C1	15.3	0.557	2.61	17	27
C2	7.5	0.47	3.33	22	20
C3	4.5	0.2	3.9	22	10
C4	9	0.55	3.92	20	24
C5	5.2	0.175	3.12	20	10
C6	5	0.127	2	20	9
C7	4.7	0.172	2.6	15	10
C8	4.9	0.266	2.7	22	18
C9	3.7	0.18	3.6	19	11
C10	30.1	0.78	3.96	19	30
C11	9.2	0.756	3.65	19	34
C12	4.8	0.25	2.6	25	14
C13	7.5	0.35	1.5	25	20
C14	8.3	0.244	2.7	16	20
C15	4.3	0.45	2	36	20
C16	4.7	0.34	4.1	35	14
C17	3.9	0.332	1.8	32	16
C18	11.4	0.27	3.4	16	11

A partir de una regresión lineal, se pudo determinar una ecuación correspondiente al tiempo de concentración que puede ser usada para las cuencas urbanas de la ciudad de Barranquilla, considerando que estas tienen las mismas características de la cuenca Torcoroma en la cual se usaron los parámetros de esta para la definición de esta ecuación.

En la medida que se cuente con más registros de lluvias y caudales en cada uno de los arroyos, esta ecuación puede ser modificada en sus coeficientes permitiendo ajustarlo mejor a las condiciones de drenaje de la ciudad

$$Tc \text{ (min)} = 10.4 + 0.166 * A \text{ (Ha)} + 35.6L * \text{ (Km)} - 3.09 * So(\%) + 0.15 * P (\%)$$

Teniendo en cuenta los resultados estadísticos de esta regresión, se obtuvo que cada coeficiente de la regresión presentó un valor p de 0.05 o menor, lo cual muestra que estadísticamente son valores significativos dentro de la regresión. Por otro el R^2 da de 0.99 y el error cuadrático medio da 2.31, mostrando un buen ajuste entre los datos observados y los calculados por la ecuación generada. Los residuos presentados en la Figura 13-3 muestran una tendencia aleatoria con media cercana a 0 y una distribución normal.

Tabla 13-4. P value coeficientes regresión lineal

Predictor	p
Constante	0.058
Área (Ha)	0
Longitud (Km)	0
Pendiente %	0.001
Permeabilidad %	0.039

Tabla 13-5. Estadísticos de ajuste regresión lineal

Estadístico	Valor
SLE	2.25
R-cuad.	90%
R-cuad.(ajustado)	93%

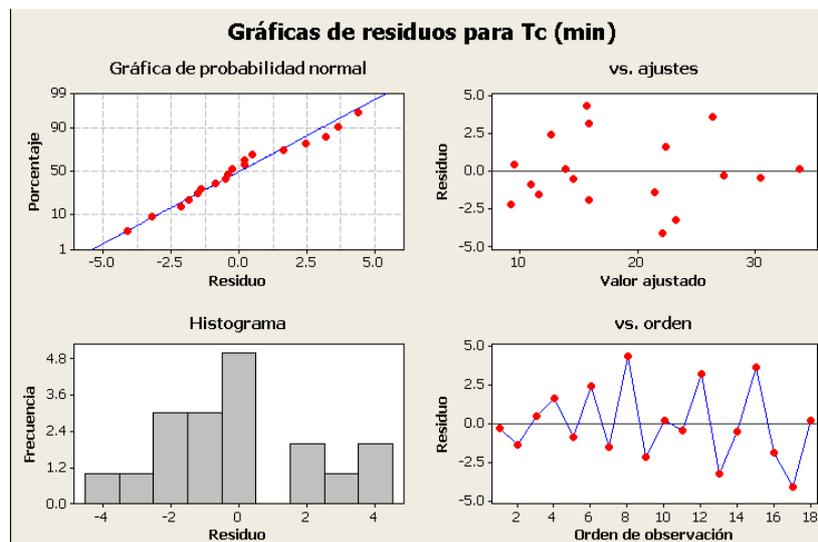


Figura 13-3. Resultados de residuos regresión lineal tiempo de concentración Torcoroma

14 Calibración cuenca Felicidad

A partir de la ecuación de tiempo de concentración generada con la regresión lineal, es posible obtener valores de tiempo de concentración para otras cuencas en la ciudad considerando que estas presentan características similares en cuanto a sus variables geomorfológicas.

Esta ecuación fue utilizada para determinar el tiempo de concentración en las subcuencas de Felicidad, teniendo en cuenta las características de cada una mostradas en la Tabla 14-1.

Tabla 14-1. Variables geomorfológicas cuenca Felicidad para tiempo de concentración

Nombre	Área (Ha)	Long (Km)	Pendiente %	Perv %
1	18.9	0.38	3.59	16
2	5.2	0.135	2.2	17
3	10.8	0.55	2.21	19
4	20.1	0.72	2.65	18
5	7.8	0.43	2.51	21
6	8.4	0.17	2.51	16
7	13.5	0.415	1.85	23
8	8.0	0.45	2.48	26
9	15.4	0.47	2.02	18
10	8.2	0.45	1.44	23
11	19.6	0.36	2.08	23
12	15.5	0.55	1.38	19
13	24.8	0.82	3.84	24
14	23.5	0.85	2.17	17
15	22.4	0.95	1.94	14
16	30.1	1	1.91	14
17	23.8	0.79	1.46	13
18	29.0	1	2.4	19
19	17.6	0.75	2.64	13
20	14.6	0.5	1.79	10

Aplicando la ecuación se obtuvieron los valores de tiempo de concentración mostrados para cada una de las subcuencas de Felicidad. De los resultados obtenidos el valor mínimo de tiempo de concentración fue de 16 minutos para la subcuenca 12 y la máxima de 47 minutos para la subcuenca 16.

Tabla 14-2. Tiempo de concentración subcuencas Felicidad

Nombre	Tc (min)
1	18
2	12
3	28
4	34
5	22
6	12
7	25
8	24
9	26
10	27
11	23
12	31
13	35
14	40
15	44
16	47
17	40
18	46
19	34
20	27



Figura 14-1. Subcuencas Felicidad

Tabla 14-3. Rugosidades subcuencas Felicidad

Nombre	N Imperv	N Perv	Nombre	N Imperv	N Perv
1	0.01	0.03	11	0.011	0.02
2	0.011	0.012	12	0.01	0.012
3	0.008	0.01	13	0.01	0.015
4	0.01	0.012	14	0.009	0.01
5	0.01	0.011	15	0.01	0.02
6	0.011	0.02	16	0.011	0.015
7	0.01	0.012	17	0.009	0.015
8	0.009	0.015	18	0.01	0.015
9	0.01	0.012	19	0.009	0.012
10	0.01	0.015	20	0.01	0.013

15 Tormenta para evaluación de peligrosidad

Para la evaluación e implementación del sistema de alertas temprana, se consideró el evento del 23 de Agosto del 2014. Este evento presentado en las horas del mediodía, se caracteriza por ser el primer evento presentado en el segundo semestre del año 2014 en el cual se reportó precipitación en la mayoría de las estaciones pluviométricas ubicadas en la ciudad, registrando altas precipitaciones e intensidades en algunas de ellas.

Para la red de monitoreo, las estaciones que inciden sobre la respuesta hidrológica en la escorrentía de la cuenca Felicidad son las “Delicias”, “Chiquinquirá” y “Bomberos”. Cada una de estas estaciones registró una precipitación acumulada con intervalos de 1 minuto. La Tabla 15-1 muestra la precipitación registrada para pluviómetro durante el evento.

Tabla 15-1. Precipitación acumulada en tormenta pluviómetros cuenca Felicidad

Estación	Precipitación (mm)
Delicias	36
Chiquinquirá	82
Bombero	18

Debe aclararse que el registro de precipitación en cada uno de los pluviómetros que inciden en la cuenca Felicidad no se dio a la misma hora. La Tabla 15-2 muestra las horas de inicio, fin y duración de tormenta de los registros obtenidos para cada pluviómetro

Tabla 15-2. Duraciones de lluvia para cada pluviómetro de la cuenca Felicidad

Estación	Hora inicio lluvia	Hora fin lluvia	Duración lluvia
Delicias	01:16	02:45	01:29
Chiquinquirá	01:46	03:15	01:29
Bombero	02:01	02:55	00:54

Dentro de las duraciones observadas en cada uno de los pluviómetros, se tiene que la lluvia tiene una duración neta de 2 horas, con lo cual para intervalos de 1 minuto se tienen en total 120 pulsos de precipitación a partir de la combinación de cada uno de los tres hietogramas mostrados a continuación.

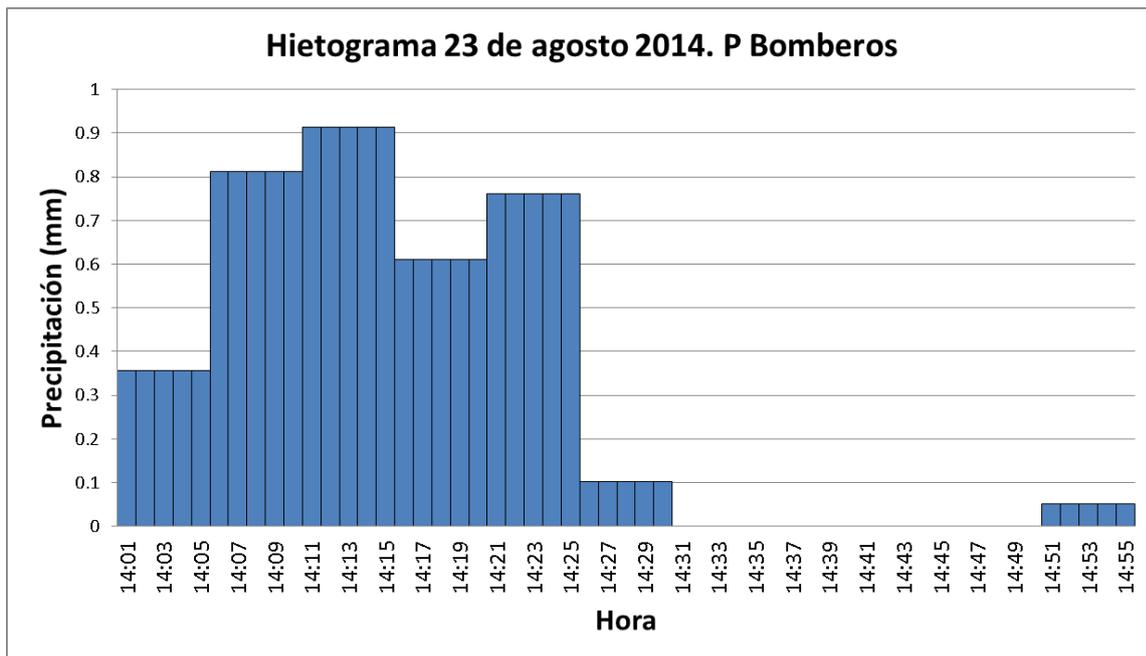


Figura 15-1. Hietograma lluvia 23 de agosto de 2014. Pluviómetro Bomberos

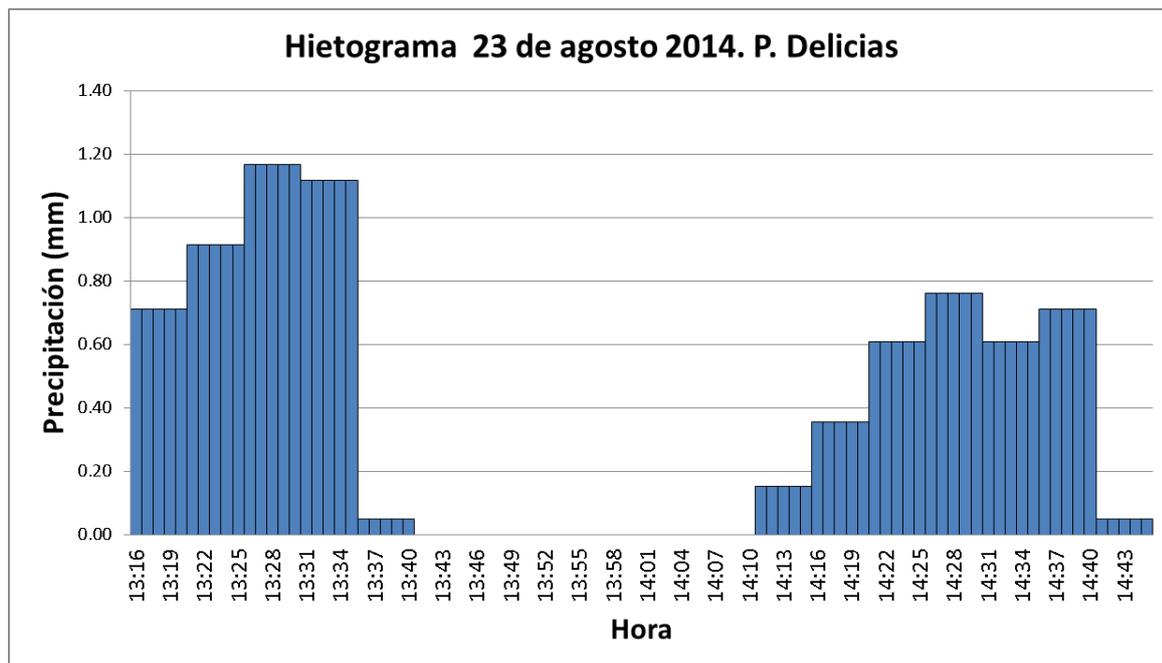


Figura 15-2. Hietograma lluvia 23 de agosto de 2014. Pluviómetro Delicias

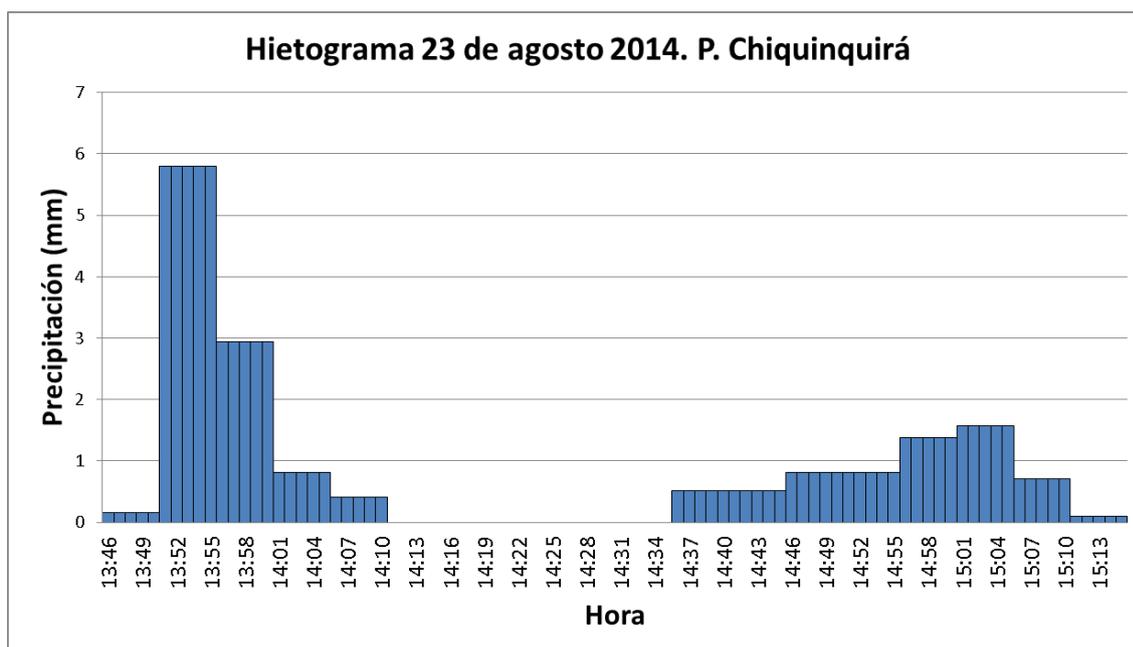


Figura 15-3. Hietograma lluvia 23 de agosto de 2014. Pluviómetro Chiquinquirá

A partir los hietogramas en cada estación pluviométrica, se pudo determinar las intensidades promedios de la lluvia registrada y la intensidad máxima para cada pulso de lluvia. La Tabla 15-3 muestra los valores obtenidos para cada intensidad, en los cuales la estación Chiquinquirá presentó la mayor intensidad promedio en el registro de lluvia con 58 mm/h y la mayor intensidad registrada por pulso con 360 mm/h

Tabla 15-3. Caracterización de lluvia 23 de Agosto de 2014

Estación	Duración lluvia (min)	Precipitación acumulada (mm)	Intensidad máxima por pulso (mm/h)	Intensidad promedio (mm/h)
Delicias	89	36	70	24
Chiquinquirá	89	82	360	58
Bombero	54	18	55	20

Para cada una de las estaciones se analizó tanto la precipitación acumulada como la intensidad promedio. A partir de las Figura 15-4 y Figura 15-5 las cuales muestran las curvas IDF de la estación del aeropuerto Ernesto Cortissoz y la curva de probabilidad de no excedencia de precipitación máxima diaria, se definieron los periodos de retorno correspondientes a la estación Chiquinquirá para un periodo de retorno de 2 años asociado a la precipitación y 5 años para la precipitación media de la lluvia.

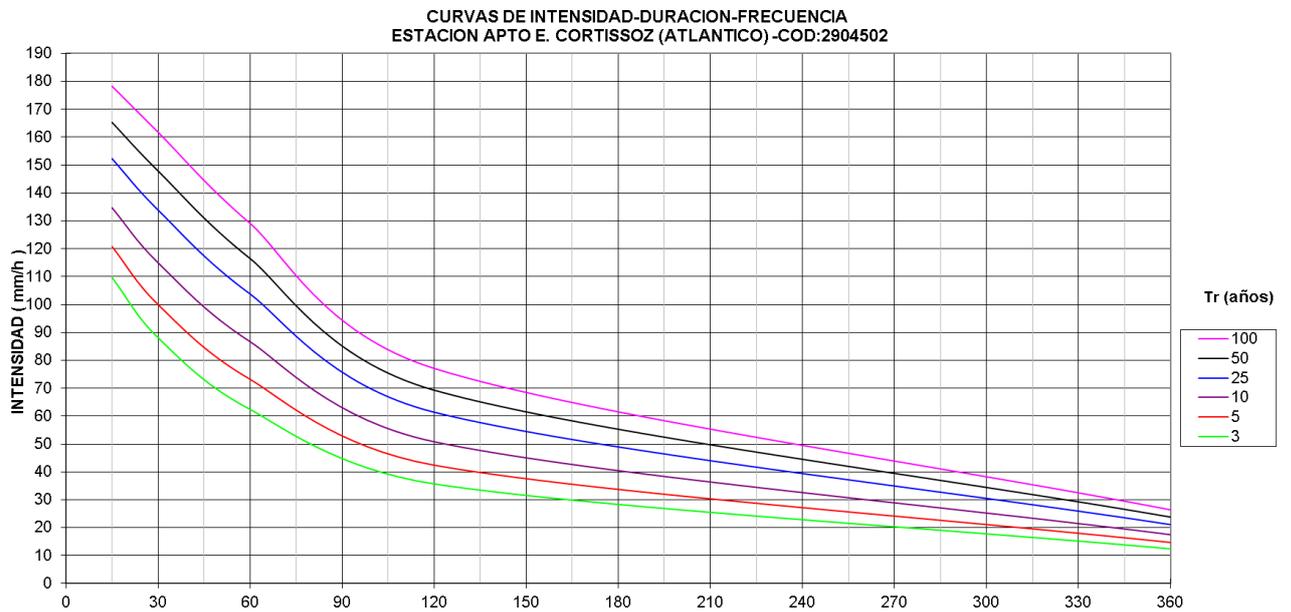


Figura 15-4. Curva IDF estación Aeropuerto Ernesto Cortisoz. Fuente IDEAM

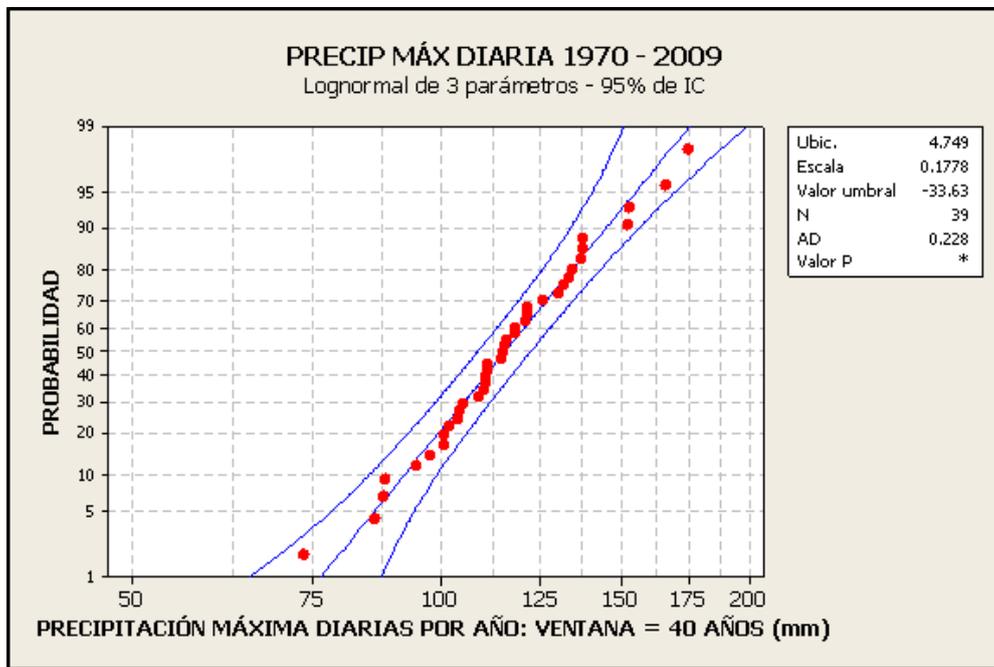


Figura 15-5. Curva de probabilidad de no excedencia de precipitación máxima diaria

Teniendo en cuenta el análisis elaborado mediante los polígonos de Felicidad a partir de los tres pluviómetros (Delicias, Bombero, precipitación equivalente descrita en el capítulo 0 para cada una de las 20 subcuencas considerando la Tabla 9-10 (Capítulo 9.4:

A partir de las precipitaciones equivalentes obtenidas se pudo representar de manera gráfica la distribución tanto espacial como temporal del evento del 23 de Agosto sobre la cuenca en la Figura 15-6. En esta figura se ve como la lluvia sigue una línea de tiempo dada por la duración del evento de lluvia, así como la precipitación calculada en cada una de las subcuencas. La número 1 está ubicada en la parte más alta de la cuenca y la 20 en la parte más baja. (Figura 15-7)

De igual forma se puede ver como el evento se presenta de manera más intensa en la parte media con una intensidad máxima de 360 mm/h, y en el resto de la cuenca se presentan intensidades medias de 4 mm/h durante algunos intervalos de tiempo.

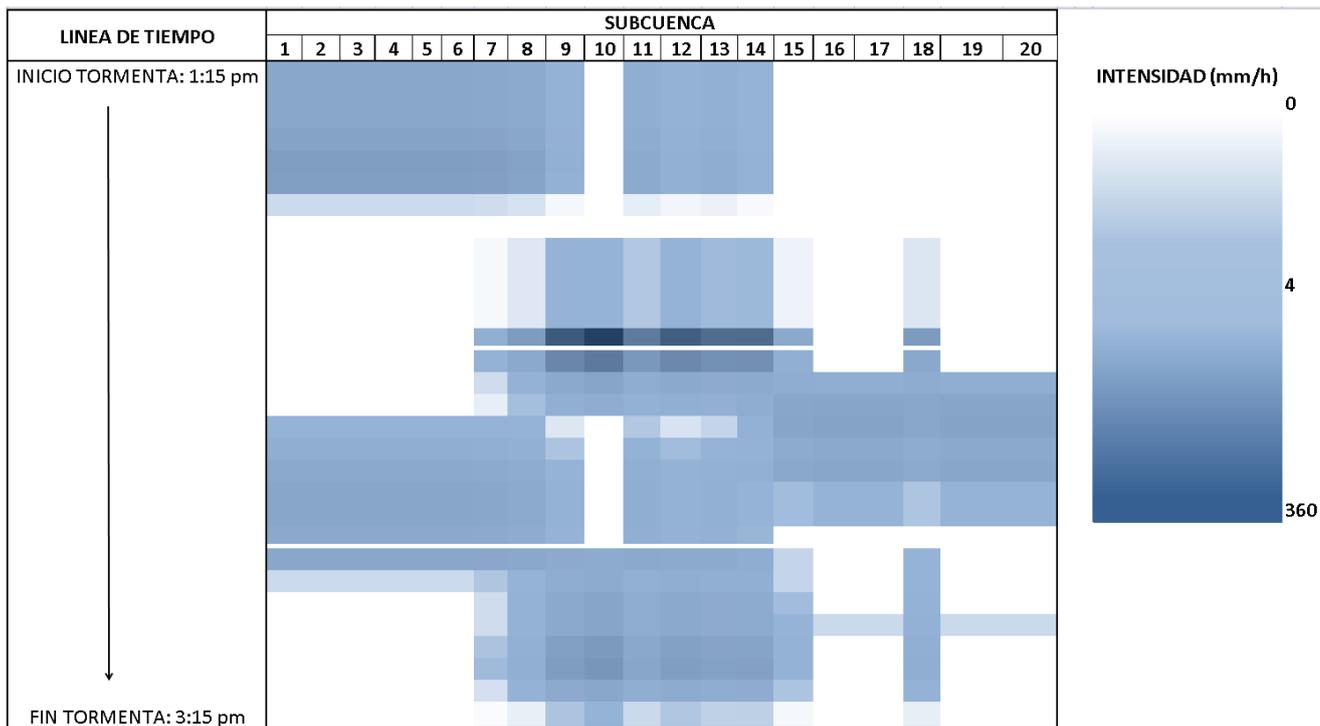


Figura 15-6. Distribución temporal y espacial tormenta 23 de Agosto en cuenca Felicidad

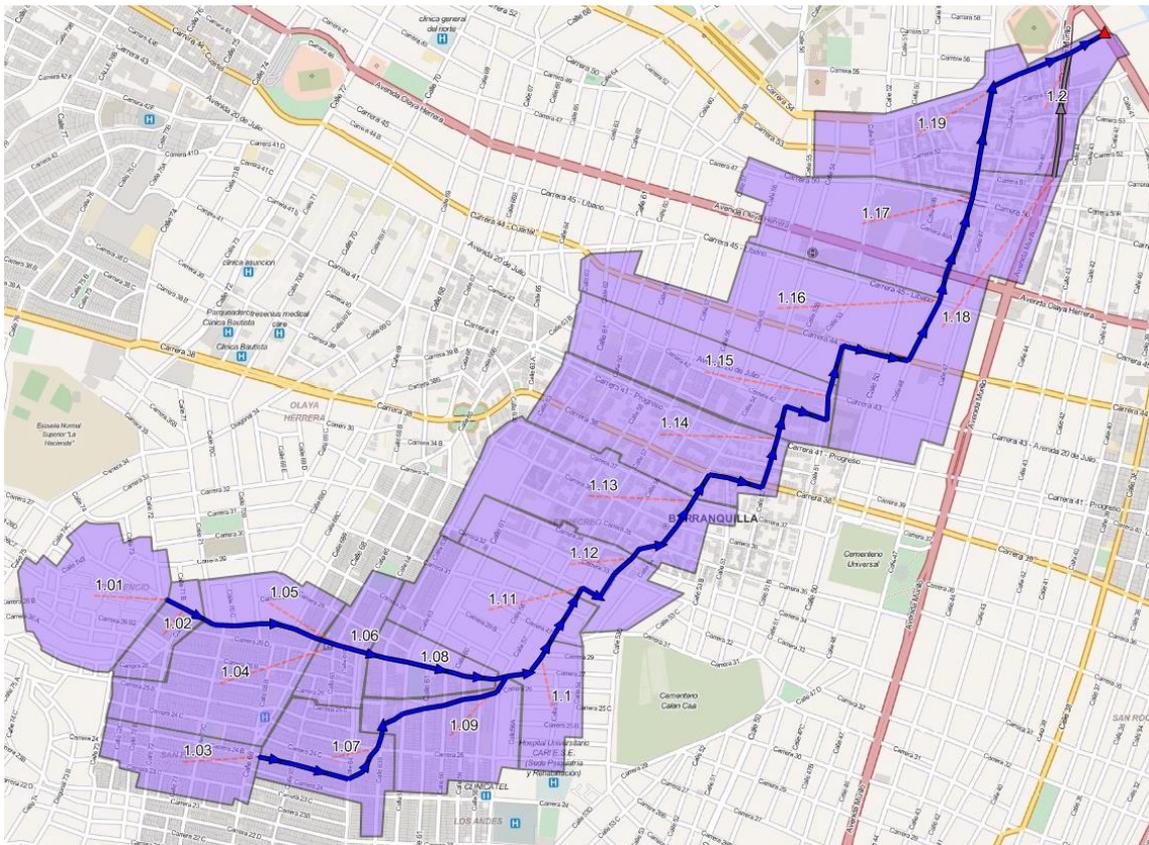


Figura 15-7. Ubicación subcuencas Felicidad

La Figura 15-6 muestra como una en evento de lluvia puede presentarse de manera variable tanto en tiempo como en espacio para una cuenca urbana con área de 336 Ha. Esto demuestra como aproximaciones elaboradas a partir de métodos hidrológicos tradicionales tales como el método racional donde se asume que la tormenta se distribuye de igual forma para toda la cuenca, puede generar sobre estimaciones y mayores incertidumbres en las variables de salida, como los caudales. Sin embargo, el evento del 23 de Agosto fue analizado a partir de 3 pluviómetros que se encuentran lo suficientemente lejanos para obtener variaciones considerables de precipitación, generando así un nivel de incertidumbre. Con base en esto la incertidumbre se verá disminuida a medida que la red de monitoreo se vuelva más densa, obtenido así información de lluvia en sectores más específicos.

16 Análisis de peligrosidad

A partir de investigaciones realizadas por Shand (2011), se obtuvo que la peligrosidad de flujo de escorrentía viene dada por el momento ejercido sobre una persona o un vehículo que sea capaz de dejarlo inestable para ser arrastrado. Este momento deberá superar al momento resistente del individuo el cual varía según el peso de este. A partir de estos análisis se realizaron categorías de peligrosidad en función de la profundidad y velocidad de flujo como el producto de estas variables, haciendo que la peligrosidad se exprese en m^2/s .

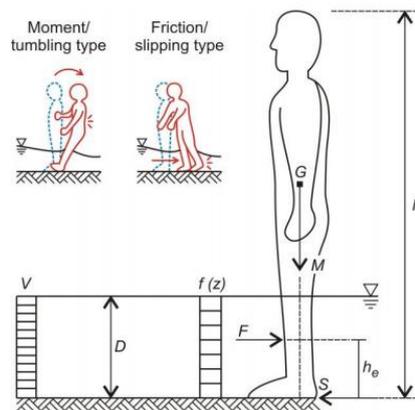


Figura 16-1. Modelos de inestabilidad de personas y vehículos (Shand, 2011)

Para esta investigación la peligrosidad fue medida exclusivamente para las personas, en el cual los niveles definidos dependen de las condiciones físicas y el peso de cada individuo. Esta clasificación fue tomada en cuenta debido a que la mayoría de víctimas por parte de los arroyos se han presentado por casos en los cuales estas se confían sobre la condición de los arroyos, queriendo atravesar alguna de las calles por donde fluyen estas corrientes de agua y por lo tanto son arrastrados. También se presentan casos donde un conductor intenta cruzar un arroyo y su vehículo se apaga sin ser arrastrado, de esta manera el conductor queda expuesto por el arroyo al momento de querer salir del vehículo. La Figura 16-2 muestra el número de accidentes por arroyos registrados por distintas causas, donde los peatones imprudentes y conductores imprudentes son las causas de mayores accidentes.

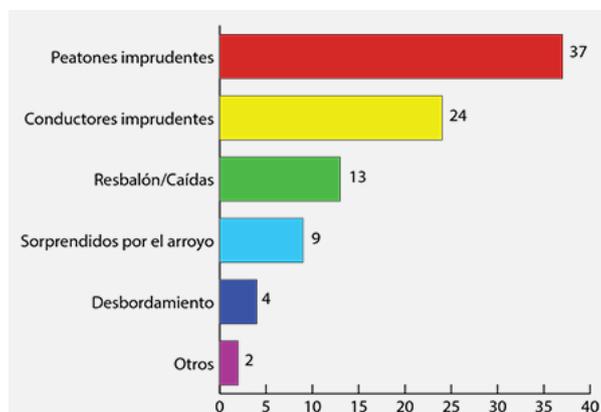


Figura 16-2. Número de accidentes por arroyo para distintas causas. Fuente:

www.arroyosdebarranquilla.co

De esta manera la Tabla 16-1 muestra los niveles obtenidos a partir de estudios realizados por Cox (2010), donde analizaron las condiciones de peligrosidad para personas a partir inundaciones presentadas en Australia. Esta categoría está realizada para los individuos donde la condición física y la edad de una persona definen dichos niveles. Para este caso se tomó la clasificación de adultos dado son quienes intentan cruzar de manera imprudente estas corrientes.

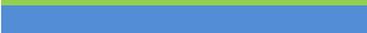
Tabla 16-1. Categorías de peligrosidad para personas Cox (2010)

DV (m ² /s)	Niños (H.M = 25 a 50 Kg)	Adulto (H.M> 50 Kg)
0	Ninguna peligrosidad	Ninguna peligrosidad
0- 0.4	Baja peligrosidad	Baja peligrosidad
0.4-0.6	Peligrosidad significativa	
0.6-0.8	Peligrosidad muy alta	Peligrosidad moderada
0.8-1.2		Peligrosidad significativamente alta
>1.2		Peligrosidad muy alta

Estos niveles fueron implementados para usarlos en el sistema de alerta temprana, de esta manera se tomaron 5 niveles a los cuales se les realizó una descripción y una representación de colores que permitirán a las personas un mejor entendimiento al momento de generar reportes en las condiciones de los arroyos. La

Tabla 16-2 las categorías implementadas para el sistema de alerta en esta investigación

Tabla 16-2. Niveles de peligrosidad implementados en arroyos de Barranquilla

Nivel de peligrosidad (m ² /s)	Representación	Descripción
0 - 0.4		Ninguna
0.4 - 0.6		Baja
0.6 - 0.8		Media
0.8 - 1.2		Alta
> 1.2		Muy alta

17 Resultados

Para cada una de las calles del arroyo Felicidad se extrajeron los resultados de caudales, velocidades y profundidades de flujo, permitiendo calcular los niveles de peligrosidad para cada instante de tiempo. La lluvia presentada fue analizada a partir de la modelación de cada uno de los pulsos de lluvia de manera acumulada (120 pulsos), obteniendo así 120 hidrogramas de caudales, velocidades y profundidades en cada calle. Esto permitirá presentar el sistema de alerta de manera reactiva en donde los resultados y reportes se irán presentando a medida que la lluvia transcurra.

Se analizaron tres calles sobre el cauce para este evento de lluvia. Una en la parte más alta de la cuenca (Carrera 27 con Calle 71- Elemento 1), una en el tramo medio de la cuenca (Carrera 44 con Calle 50 – Elemento 43) y en el tramo final correspondiente descarga del cauce (Carrera 54 con Vía 40 – Elemento 55).

Para cada una de las calles señaladas se mostrarán los resultados obtenidos a partir del modelo PCSWMM en cuanto a las variables hidráulicas de interés así como de los niveles de peligrosidad mostrados por el sistema de alerta temprana.

Elemento 1: Carrera 27 con Calle 71

La Carrera 27 con Calle 71 representa el conducto con ID 1.01 para el modelo cauce de Felicidad. Dentro de la caracterización se tomó esta calle como el inicio del arroyo donde drena la subcuenca 1 y 2 con un área total de 23 hectáreas, e incide el pluviómetro “Delicias” para la estimación de precipitación. A partir de la modelación de los 120 pulsos de lluvia en cada subcuenca, es posible ver el crecimiento en las gráficas de caudal, velocidad y profundidad a medida que avanza la lluvia. En las Figura 17-1 y Figura 17-2 muestran los hidrogramas generados para el primer pulso de lluvia de la tormenta registrada y para toda la tormenta acumulada. Entre estos dos hidrogramas se desarrollarán una serie de hidrogramas que darán información acerca de los niveles de peligrosidad en el arroyo a medida que avance la lluvia

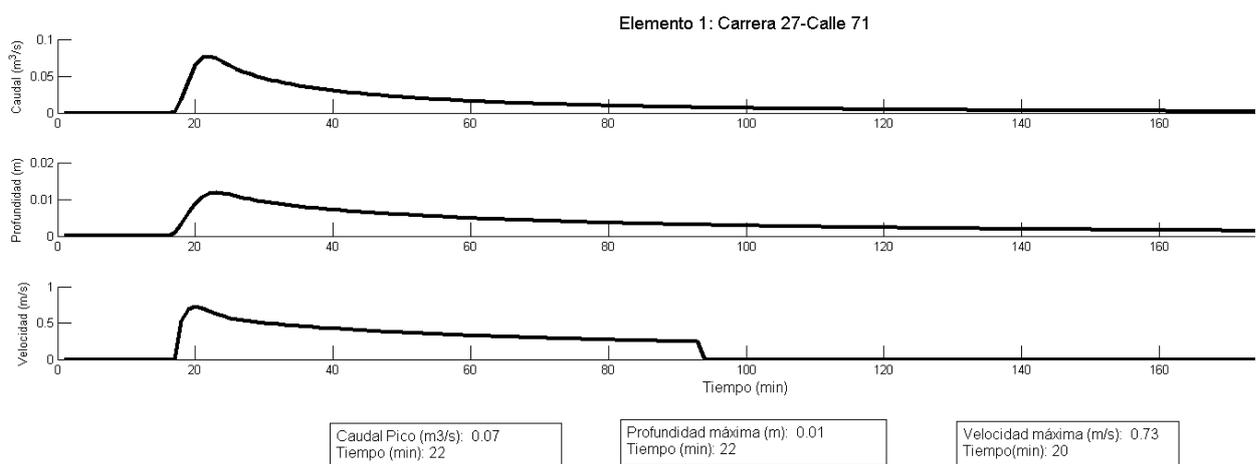


Figura 17-1. Hidrogramas generado durante el primer pulso de lluvia

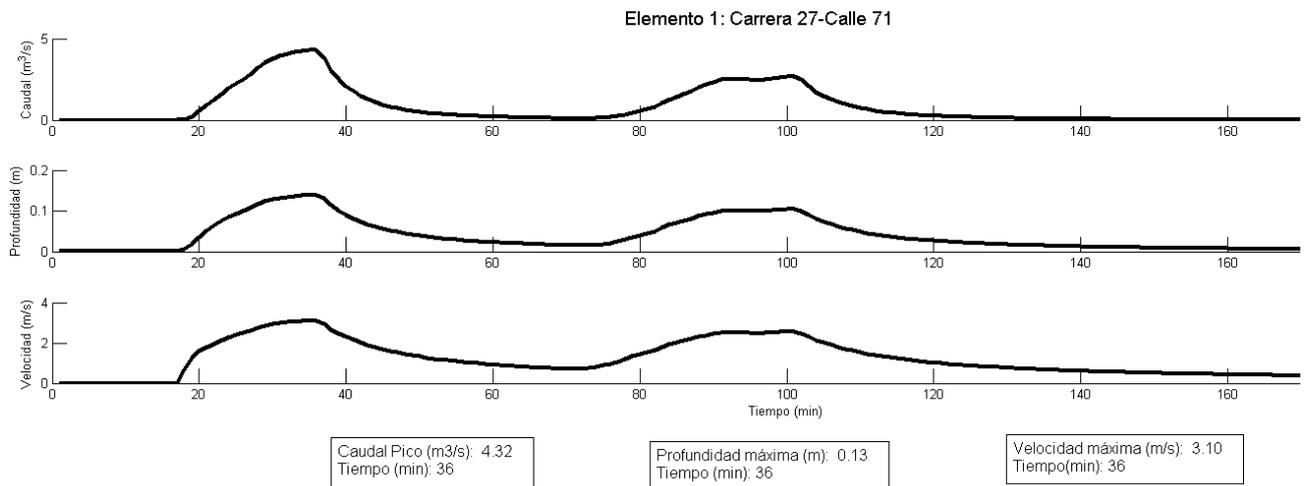


Figura 17-2. Hidrograma generado para todo el evento de lluvia

Una vez modelado cada pulso de lluvia de manera acumulativa, es posible obtener un hidrograma para cada variable de interés tal como lo muestra la Figura 17-3 donde existen en total 120 hidrogramas correspondiente a cada acumulación de pulsos en cada minuto de lluvia

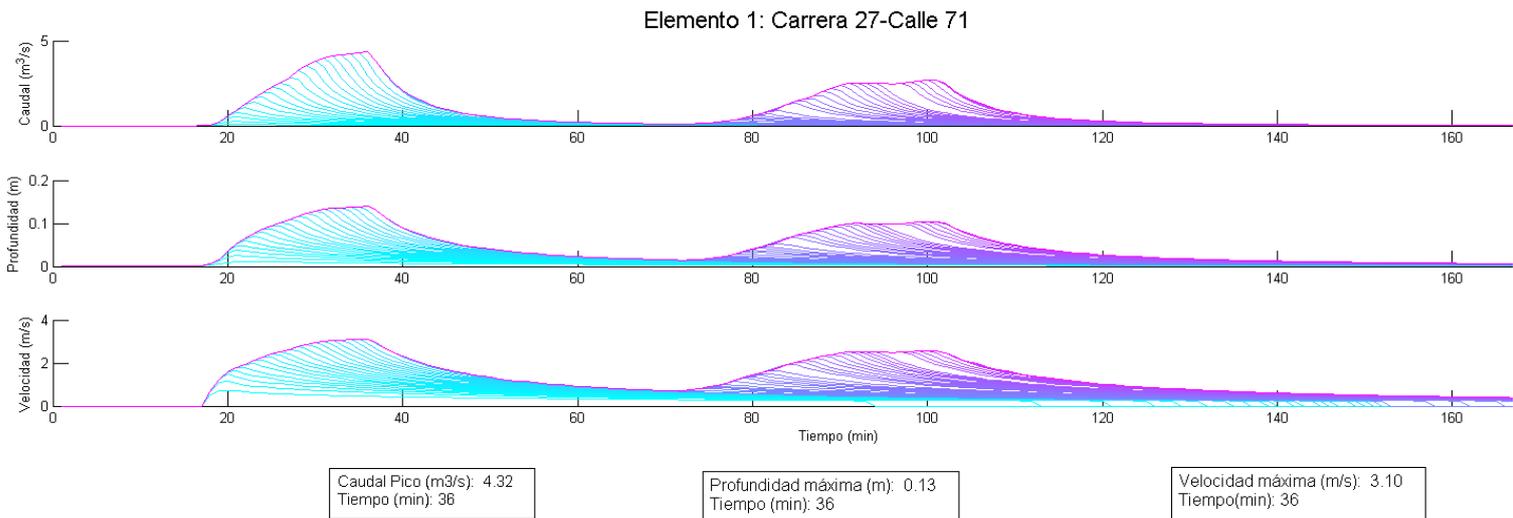


Figura 17-3. Hidrogramas Elemento 1: Carrera 27 - Calle 71

Observando cada una de los hidrogramas puede verse que el arranque de este se da cercano al minuto 18 sobre el eje X, asumiendo que la lluvia se da en el instante 0 de cada gráfica. Este efecto se debe a que para el elemento número 1 correspondiente a la Carrera 27 con Calle 71, el área de drenaje correspondiente a la cuenca 1 tiene un tiempo de concentración de 18 minutos.

Durante el evento de lluvia se presentaron dos picos, uno al inicio de mayor magnitud y otro al final del evento de lluvia. En este caso se obtuvieron los caudales, velocidades y profundidades máximas al minuto 36 y sus correspondientes magnitudes se presentan en la Tabla 17-1

Tabla 17-1. Variables máximas Elemento 1: Carrera 27 – Calle 71

Caudal pico(m3/s)	4.32
Profundidad máxima (m)	0.13
Velocidad máxima (m/s)	3.1

Una vez generadas las gráficas de las variables hidráulicas como caudal, velocidad y profundidad se calculó para cada instante de tiempo la correspondiente la peligrosidad que está en función tanto de la velocidad como de la profundidad de flujo.

Las Figuras 17.4, 17.5 y 17.6 muestran los resultados provenientes de la generación del sistema de alerta temprano propuesto para esta investigación. En estas figuras se pueden ver la evolución de los niveles de peligrosidad observados y pronosticados durante el transcurso de la lluvia y una vez esta haya terminado.

Para cada una de las gráficas generada en los resultados del sistema de alerta, se identificará un punto el cual irá avanzando en la línea de tiempo sobre el eje X, representando el tiempo actual. De esta manera lo que se encuentre por delante de este punto representará los niveles de peligrosidad próximos y los cuales serán reportados en un cuadro de texto mostrando el tiempo al cual se esperará presentar dicho nivel

En la Figura 17-4 se tiene el estado del sistema de alerta temprana en el momento que comienza a generar el evento de lluvia. Puede verse la ubicación del punto con valor de 0 sobre el eje Y en el cual se genera el correspondiente reporte del estado actual de peligrosidad. Dependiendo el nivel de peligrosidad donde se encuentre ubicado el punto que representa el tiempo actual, irá modificando el reporte de la peligrosidad, que para el momento de inicio es cero.

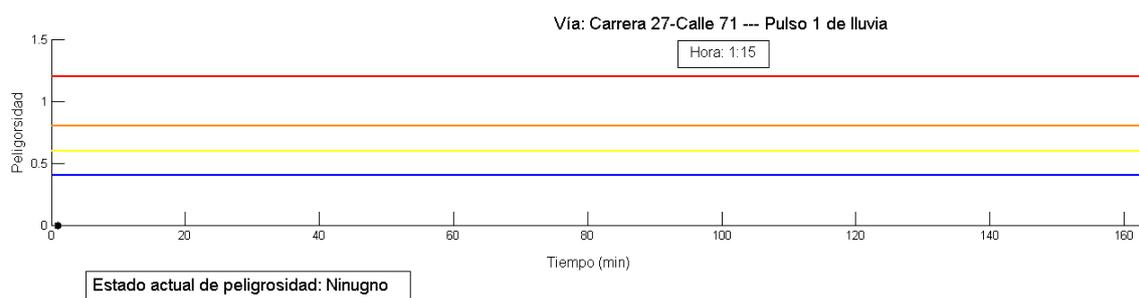


Figura 17-4. Sistema de alerta temprana. Elemento 1. Hora: 1:15

Posteriormente la lluvia avanza tal como lo muestra la Figura 17-5. Se activa el sistema y genera un alerta que indica peligrosidad azul a la 1:46 durante la acumulación lluvia hasta el pulso 32. En este caso se presentará el reporte del estado actual de peligrosidad y el reporte correspondiente al tiempo donde se dejará de tener peligrosidad, alcanzando un tiempo de 4 minutos. Esto significa que para esta calle solo existirá un nivel de peligrosidad azul que se mantendrá durante 4 minutos.

Este nivel de peligrosidad puede ser relacionado con la velocidad máxima presentada en la calle presentada en la Tabla 17-1 la cual fue de 3.1 m/s aun así la profundidad máxima fuese de 13 cm.

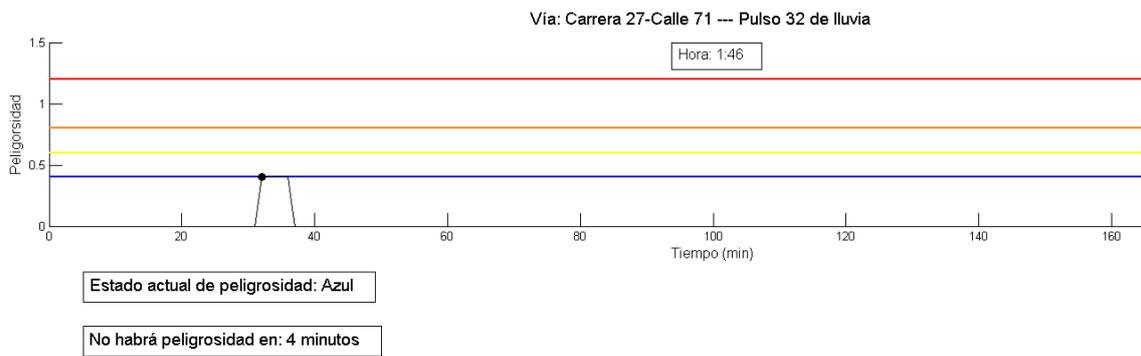


Figura 17-5. Sistema de alerta temprana. Elemento 1. Hora: 1:45

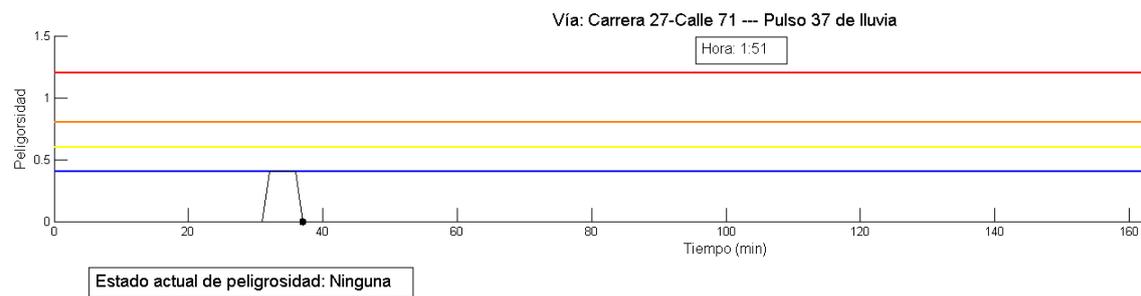


Figura 17-6. Sistema de alerta temprana. Elemento 1. Hora: 1:51

Elemento 43: Carrera 44 – Calle 50

El elemento 43 representa la Carrera 44 – Calle 50 sobre la cual se han presentado numerosos incidentes de vehículos y personas arrastradas. Para esta calle pueden verse los hidrogramas obtenidos por el modelo PCSMM mostrados en la tabla

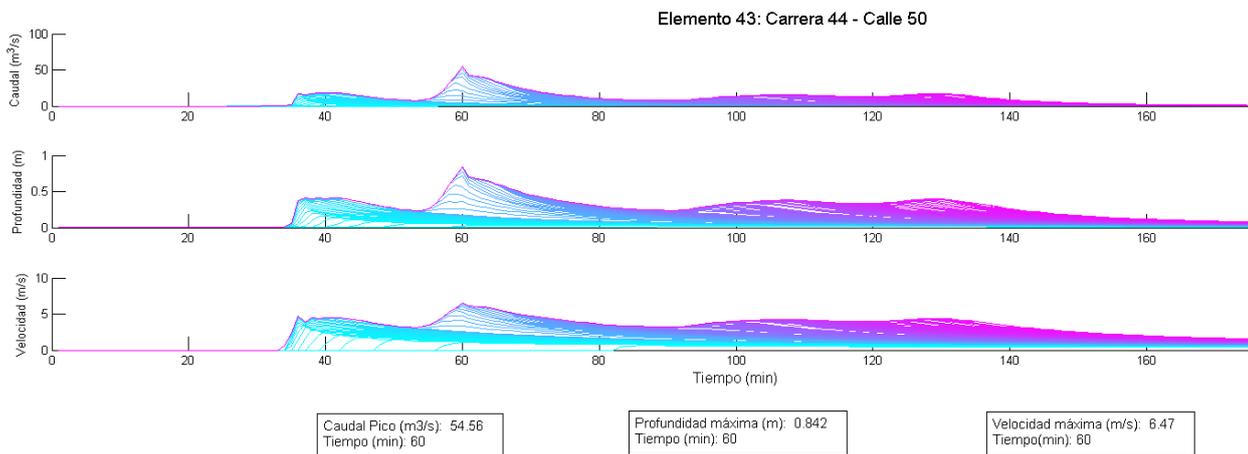


Figura 17-7. Hidrogramas Elemento 43: Carrera 43- Calle 50

Para esta calle se obtuvieron variables máximas a los 60 minutos del inicio de la lluvia cuyas magnitudes se encuentran en la Tabla 17-2.

Tabla 17-2 . Variables máximas Elemento 43: Carrera 43- Calle 50

Caudal pico(m ³ /s)	54.56
Profundidad máxima (m)	0.84
Velocidad máxima (m/s)	6.47

Los reportes obtenidos por parte del sistema de alerta pueden verse a continuación. Inicialmente en la Figura 17-8. Sistema de alerta temprana. Elemento 43. Hora: 1:32 Tal como puede verse para las distintas gráficas descritas anteriormente, los distintos niveles de peligrosidad pueden llegar a presentarse en lapsos de tiempo muy cortos, razón por la cual fue necesario presentar 4 reportes de los futuros eventos de peligrosidad con la cual las personas tengan conocimiento no solo de lo que pasará inmediatamente sino para un lapso mayor de tiempo

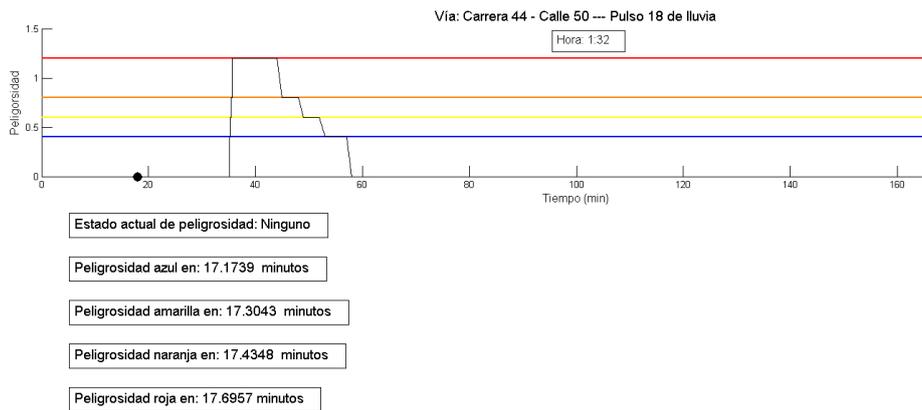


Figura 17-8. Sistema de alerta temprana. Elemento 43. Hora: 1:32

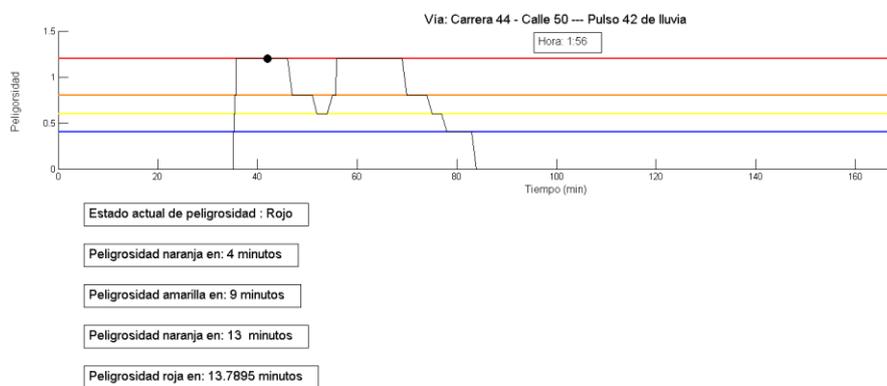


Figura 17-9. Sistema de alerta temprana. Elemento 43. Hora: 1:56

Para la Figura 17-10, mostrando el sistema de alerta para el elemento 43 a las 3:21 pm la lluvia ha terminado, y se debe informar al usuario sobre el tiempo en que se mantendrán los niveles de peligrosidad y en los cuales ya no habrá alertas. Puede verse el punto ubicado sobre la alerta roja y los siguientes 4 reportes generados. La alerta roja se mantendrá durante 10 minutos más hasta pasar a peligrosidad naranja, y posteriormente marca la peligrosidad amarilla a los 15 minutos, para finalmente alcanzar peligrosidad azul a los 18 minutos. Estos tiempos están reportados teniendo en cuenta la hora actual, y a medida que vaya avanzando la distribución temporal del evento, se irán actualizando los reportes ante la presencia de futuras alertas

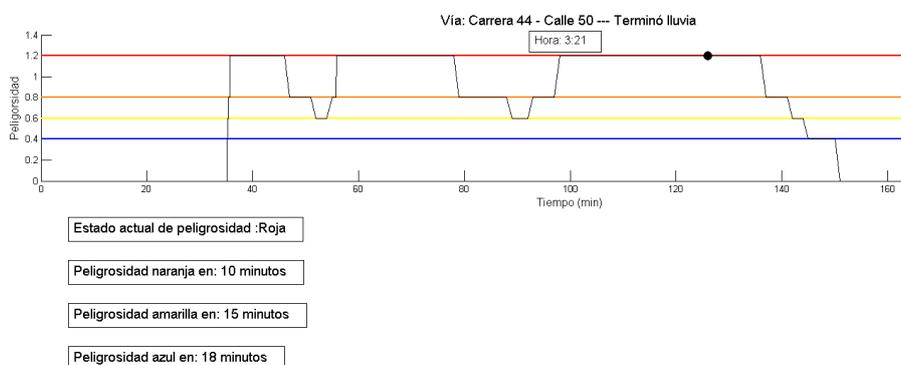


Figura 17-10. Sistema de alerta temprana. Elemento 43. Hora: 3:21

Elemento 55: Carrera 54 – Vía 40 (Descarga arroyo Felicidad)

Por último se exponen los resultados de la Carrera 54 – Vía 40. Los caudales, velocidades y profundidades máximas se describen en la Figura 17-11 y Tabla 17-3.

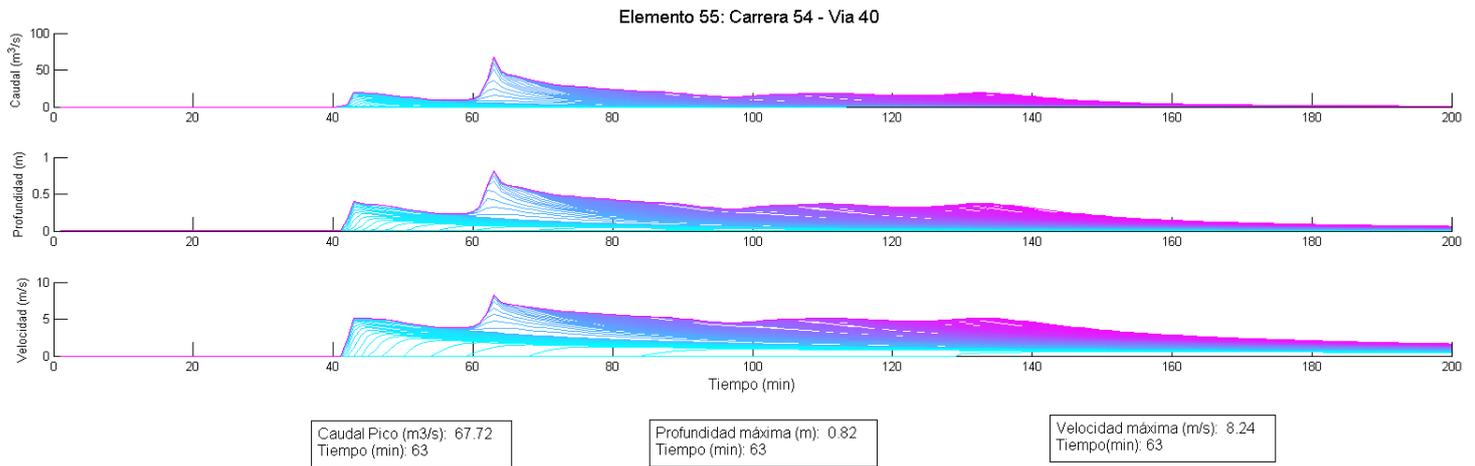


Figura 17-11. Hidrogramas Elemento 55: Carrera 54 – Vía 40 (Descarga Arroyo Felicidad)

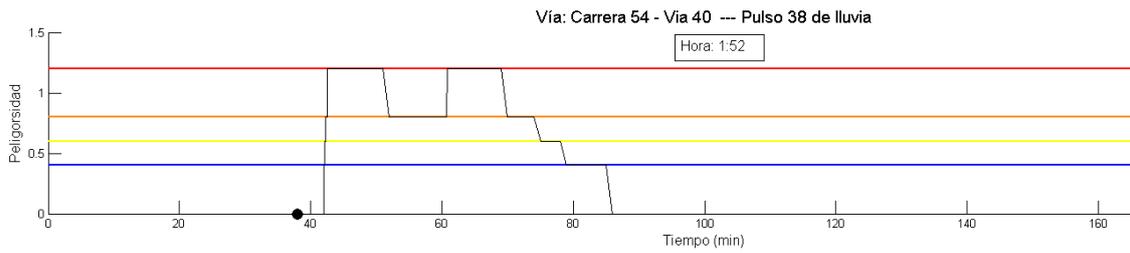
El caudal máximo presentado sobre el arroyo Felicidad para este evento de lluvia fue de $67.72 \text{ m}^3/\text{s}$, la m^3/s , la profundidad máxima fue de 0.82 metros y la velocidad máxima de 8.24 m/s, obteniendo un nivel un nivel de peligrosidad de 6.75 m^2/s , superando los umbrales con los cuales se realizó la categorización de peligrosidad aplicada (

Tabla 16-2). Si bien es claro afirmar que el arroyo es peligroso, se debe ver que el nivel presentado está muy por encima del esperado como niveles máximos de peligrosidad.

Tabla 17-3. Variables máximas Elemento 55: Carrera 54 – Vía 40 (Descarga Arroyo Felicidad)

Caudal pico(m ³ /s)	67.72
Profundidad máxima (m)	0.82
Velocidad máxima (m/s)	8.24

A continuación, se encuentra las figuras correspondiente al sistema de alerta en la descarga del arroyo durante diferentes instantes de la lluvia, así como el estado de peligrosidad una vez terminado esta.



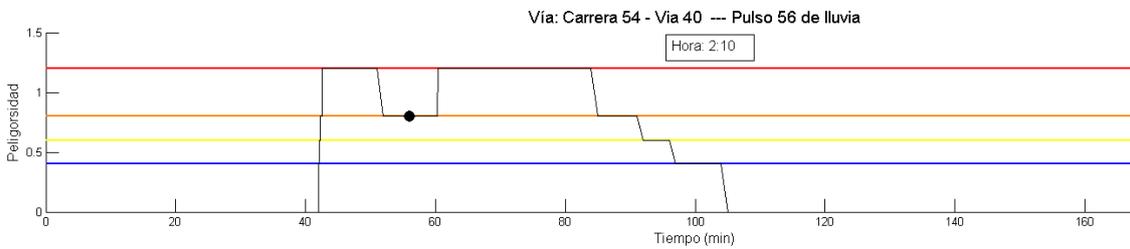
Estado actual de peligrosidad: Ninguno

Peligrosidad azul en: 4.04348 minutos

Peligrosidad amarilla en: 4.17391 minutos

Peligrosidad naranja en: 4.30435 minutos

Peligrosidad roja en: 4.52174 minutos



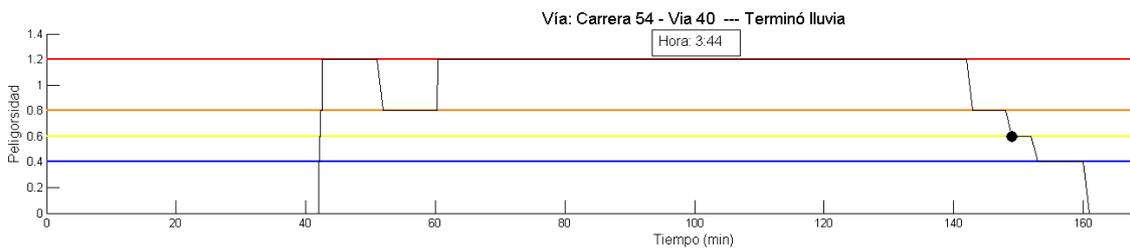
Estado actual de peligrosidad : Naranja

Peligrosidad roja en: 4.35 minutos

Peligrosidad naranja en: 28 minutos

Peligrosidad amarilla en: 35 minutos

Peligrosidad azul en: 40 minutos



Estado actual de peligrosidad : Amarilla

Peligrosidad azul en: 3 minutos

No habrá peligrosidad en 11: minutos

A partir de los análisis de los niveles de peligrosidad para las calles objeto de estudio en esta investigación a lo largo de diferentes periodos, se puede obtener información de los niveles de peligrosidad para todo el cauce en tiempos específicos.

Peligrosidad en el arroyo Felicidad a los 5 minutos de lluvia

La Figura 17-12 es un esquema visto en planta donde se pueden apreciar cada una de las subcuencas de Felicidad así como el cauce definido por una línea de color. En este caso se están analizando los niveles de peligrosidad durante los primeros 5 minutos de lluvia.

En este caso puede verse que sobre todo el eje del arroyo la línea viene dada de color verde lo cual representa que no existe peligrosidad alguna por la lluvia que se ha presentado sobre toda la cuenca durante este instante de tiempo

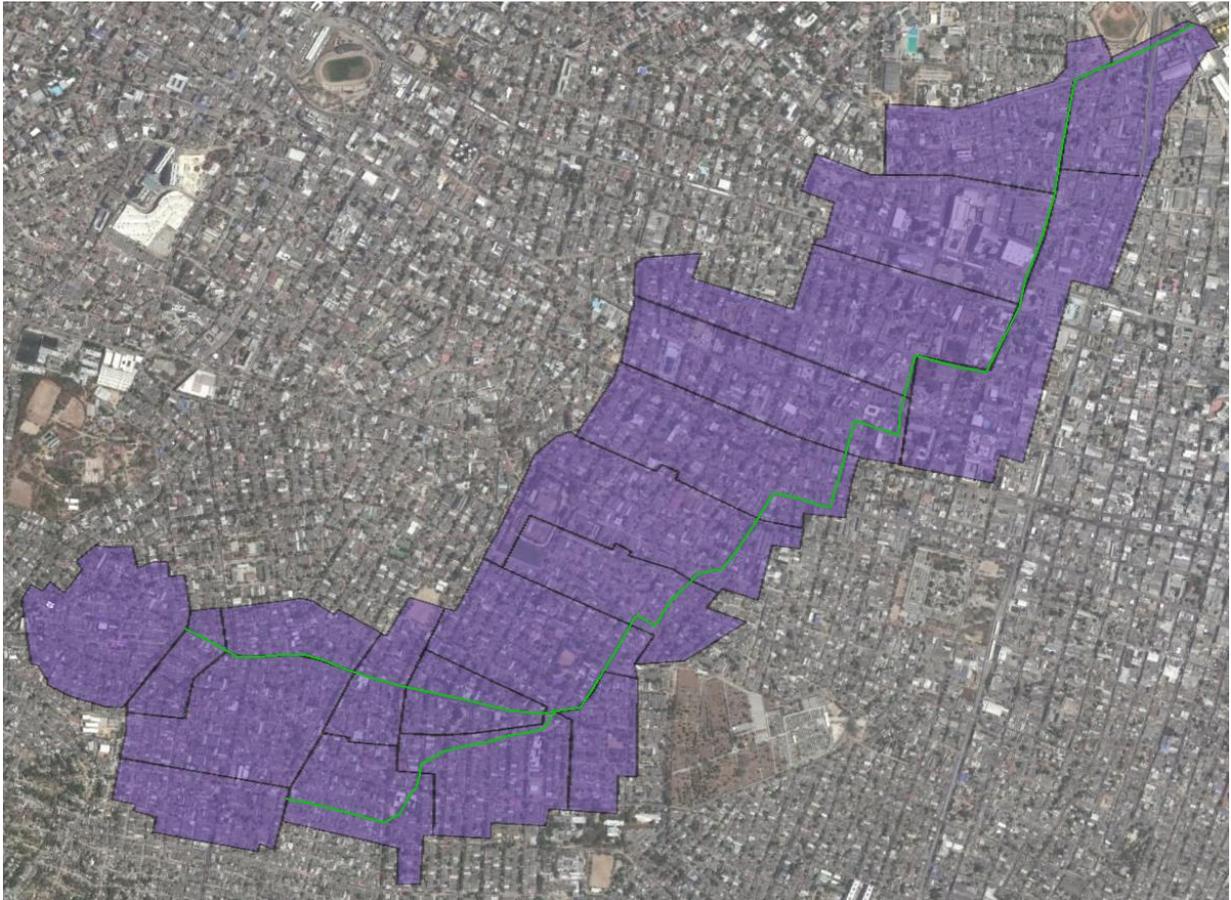


Figura 17-12. Peligrosidad en arroyo Felicidad a los 5 minutos de lluvia

Peligrosidad en el arroyo Felicidad a los 10 minutos de lluvia

Pasados 10 minutos puede verse como se aumentan los niveles de peligrosidad sobre el cauce obteniendo niveles naranja en la parte baja; y en algunos sectores alcanzan la alerta amarilla. Esta variación puede deberse a la pendiente que maneja cada una de las calles en particular que al llegar a la siguiente calle con menor pendiente bajará la velocidad.

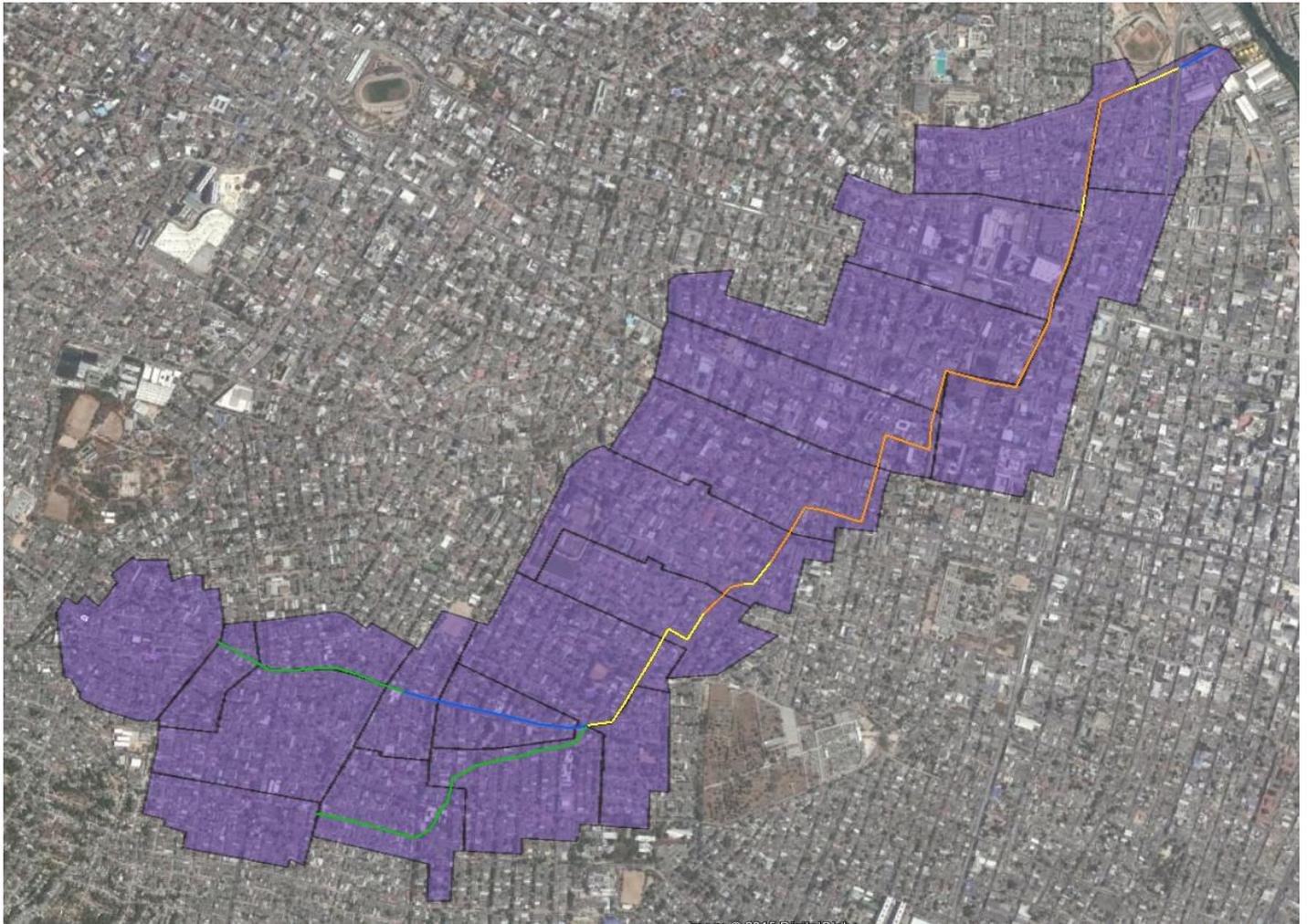


Figura 17-13. Peligrosidad en arroyo Felicidad a los 10 minutos de lluvia

Peligrosidad en el arroyo Felicidad a los 15 minutos de lluvia

Para los 15 minutos de lluvia la peligrosidad del arroyo tendrá será alta en casi todo su recorrido. De los dos brazos que alimentan al arroyo, uno nunca llega a presentar peligrosidad mientras el otro alcanza niveles amarillos y naranja, para finalmente unirse e incrementar la peligrosidad hasta niveles con alerta roja desde la 'Calle 56-Carrera 27' hasta su descarga.

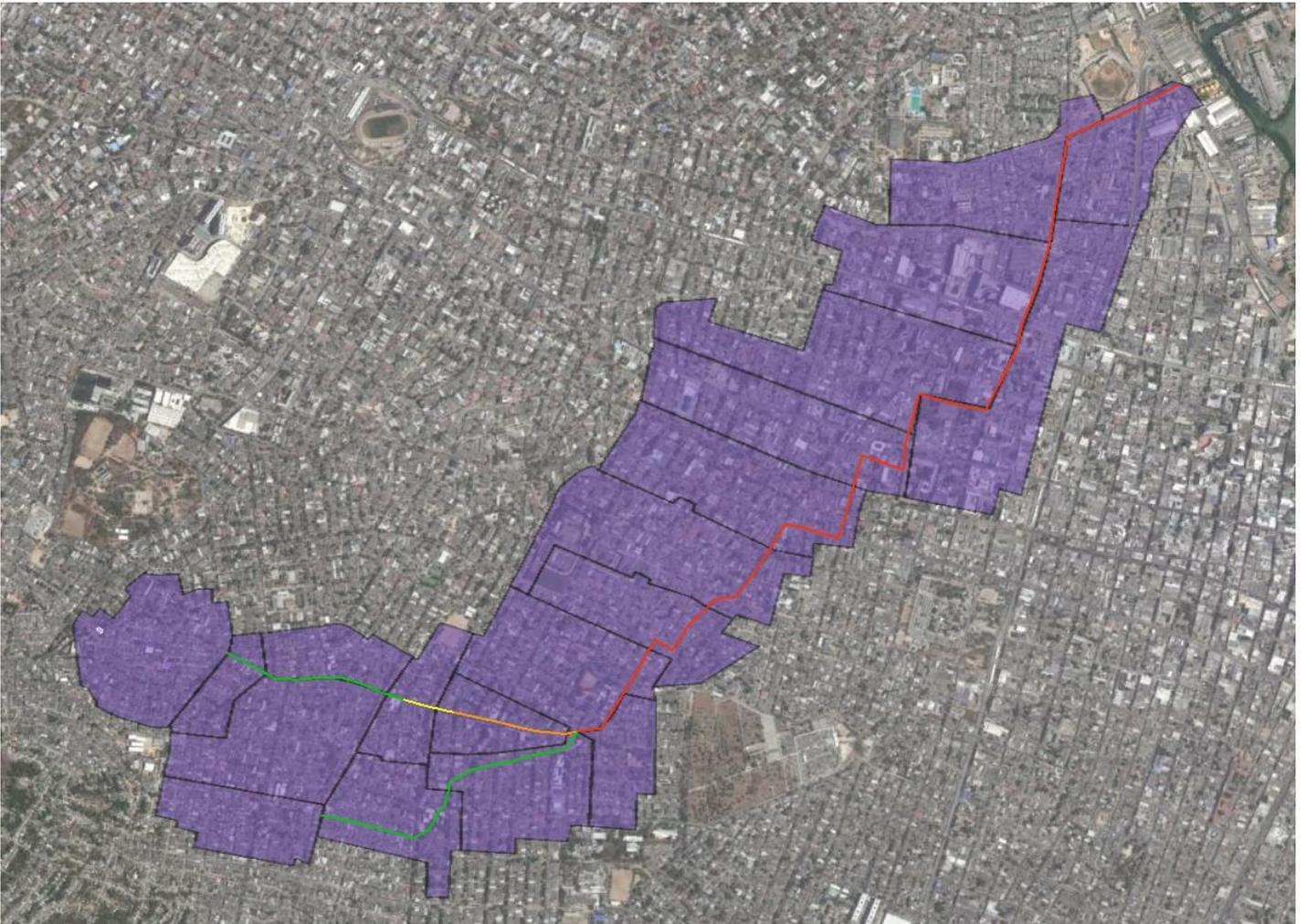


Figura 17-14. Peligrosidad en arroyo Felicidad en 15 minutos de lluvia

Peligrosidad en el arroyo Felicidad a los 30 minutos de lluvia

Para la media hora de lluvia la peligrosidad máxima se mantiene sobre casi todo el arroyo dado que los caudales picos se presentan antes de este tiempo. A partir de cada una de estas gráficas puede describirse las zonas donde el arroyo se torna peligroso a medida que avanza la precipitación, con lo cual se logra decir que de manera teórica, siguiendo los criterios de peligrosidad tomados anteriormente y basados en estudios previos, el arroyo de la Felicidad en más de un 80% de su cauce es altamente peligroso durante los eventos de lluvia.

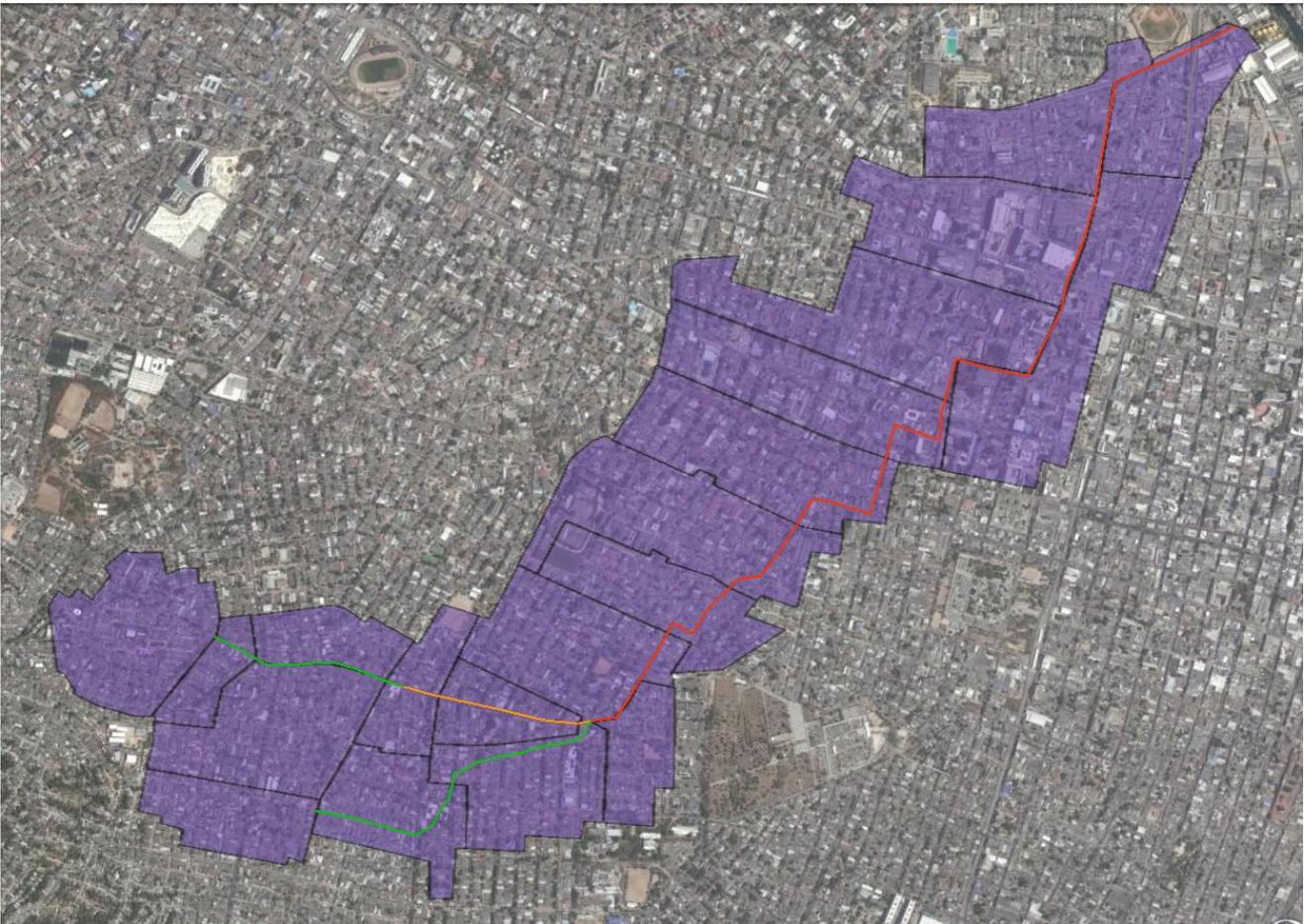


Figura 17-15. Peligrosidad en arroyo Felicidad a los 30 minutos de lluvia

18 Análisis de Resultados

Los resultados obtenidos de la modelación permiten analizar el alcance de la implementación de un sistema temprana, obteniendo información niveles de alerta con hasta 40 minutos de anticipación. En Barranquilla muchos casos de accidentes por arroyos se han presentados porque estos son sorprendidos por las corrientes presentadas, bien sea que no lloviese en el sector donde se está ubicado o porque en un corto instante los niveles de peligrosidad suben rápidamente.

Para la cuenca de estudio se caudales en la salida de 67 m³/s, velocidades de 8.24 m/s y profundidades de 0.82 metros, evidenciando la alta peligrosidad generada para este cauce.

A partir de los datos de caudales de la cuenca Torcoroma, se pudo caracterizar e implementar una ecuación en el tiempo de concentración para relacionarlo con otras cuencas de la ciudad no instrumentadas. Sin embargo, en la medida se cuente con registros en cada una, se podrá hacer un análisis de calibración individual dando así mayor exactitud y confiabilidad en los resultados obtenidos para cada evento de lluvia

La implementación del sistema de alerta temprana fue realizada a partir de la recopilación de información de lluvias y caudales sobre uno de los arroyos. Con esta información se calibró una cuenca y se obtuvo de manera más precisa los tiempos de respuesta de cada una de las cuencas. Además, la implementación de un sistema de monitoreo pluvial permitió conocer la distribución espacial y temporal de la lluvia, determinando los distintos sectores donde llueve, , evitando errores en las estimaciones en las variables hidráulicas al sobreestimar las lluvias al asumir que se distribuye de igual manera sobre toda la cuenca

Conclusiones

A partir de un modelo hidrológico, se desarrolló un sistema reactivo de alerta temprana en los arroyos de la ciudad de Barranquilla con lo cual a partir de datos de lluvia obtenidos por la red de monitoreo pluvial de la Universidad del Norte (Pluvial.co), se pudo definir para distintos puntos de un arroyo pronósticos en niveles de peligrosidad con rangos de tiempo de hasta 40 minutos.

El modelo de alerta implementado se desarrolló de manera reactiva, en el cual se generan los reportes de peligrosidad a partir de los pulsos de lluvias registrados por los pluviómetros de la red de monitoreo.

Dentro de las cuencas Torcoroma y Felicidad se encontraron similitudes en las características morfológicas tales como pendientes medias, usos del suelo y porcentajes de impermeabilidad, variando en las condiciones de forma tales como área, perímetro, longitud y ancho de la cuenca. A partir de ello se concluye que es posible correlacionar las características de ambas cuencas, permitiendo realizar criterios de calibración entre una cuenca y otra.

A partir de la instrumentación de la cuenca Torcoroma fue posible hacer un proceso de calibración para esta, variando los parámetros hidrológicos para cada subcuenca que permitían un mejor ajuste entre los hidrogramas observados para cada evento de lluvia registrado y los calculados por el modelo. Una vez calibrada la cuenca se determinaron los tiempos de concentración de forma gráfica por medio del método racional, con lo cual se determinó una ecuación a partir de una regresión lineal del tiempo de concentración en función de parámetros morfológicos de las cuencas.

Teniendo en cuenta que la caracterización realizada permitió correlacionar cada una de las cuencas de estudio, se determinaron los tiempos de concentración de cada subcuenca de Felicidad la cual no se encuentra instrumentada, aplicando la ecuación generada. De esta manera fue posible calibrar cada una de las subcuencas de Felicidad, variando los parámetros hidrológicos no medidos tal como el coeficiente de rugosidad, buscando que los hidrogramas de salida de cada subcuenca muestre el tiempo de concentración obtenido por la ecuación.

A partir de la red de monitoreo pluvial de la ciudad, se tomaron registros de lluvias reales en distintos pluviómetros sobre la cuenca Felicidad, modelando un evento donde se tuvo en cuenta la distribución espacial y temporal sobre la cuenca. De esta manera se vio como reaccionaba la cuenca cuando la lluvia se presentaba exclusivamente en algunos sectores para ciertos intervalos de tiempo. Por otro lado el hecho de simular las condiciones espaciales y temporales de un evento de lluvia permite tener mayor confiabilidad en los resultados de caudales y velocidades del arroyo.

Se generaron distintas categorías de peligrosidad las cuales vienen dadas por el producto de la profundidad y la velocidad de flujo de cada calle. Dentro de estas categorías, el nivel más alto de peligrosidad se presenta cuando el producto de estas variables supera un valor de 1.2 m²/s. Para el caso del arroyo Felicidad, se encontraron niveles de peligrosidad de hasta 6.7 m²/s, manteniendo profundidades de 0.82 m y velocidades de 8.24 m/s sobre la zona de descarga del cauce. Esto evidencia el alto riesgo existente para este arroyo con lo cual las personas se encuentran expuestas constantemente durante las temporadas de lluvia.

Para el caso del arroyo Felicidad se encontró que los niveles de peligrosidad altos se empiezan a generar desde la Carrera 27 con Calle 57 y se mantienen hasta la descarga del cauce. Sobre la Calle 72 con Carrera 27 y Carrera 27 con Calle 57 se encontraron niveles de peligrosidad medios a partir de los 15 minutos de inicio del evento de lluvia, y entre la Calle 68 con Carrera 21B y la Carrera 27 con Calle 57 no se presentaron alertas de peligrosidad en ningún instante de la lluvia.

Dentro de los resultados obtenidos por el sistema de alerta, fue necesario reportar en algunos hasta los 4 siguientes niveles de peligrosidad en cada instante de tiempo, dado que en algunas condiciones las alertas se presentaban en intervalos de tiempo muy cortos, lo cual podría dificultar a las personas tomar decisiones prontas en cuanto a su movilidad sobre la ciudad.

Recomendaciones

Dado que el sistema implementado se comporta de manera reactiva, donde los reportes de peligrosidad generados están en función de los registros obtenidos por la red de monitoreo pluvial, se pueden presentar casos donde uno de los pluviómetros falle, disminuyendo así los niveles de confiabilidad del sistema de alerta. De esta manera en la medida que se cuente con más información espacial de la lluvia aumentando el número de pluviómetros sobre la red de monitoreo, será posible aumentar los niveles de confiabilidad en los reportes del sistema de alerta.

El sistema reactivo puede llegar a ser articulado con un sistema preventivo si se instalan radares Doppler en la ciudad que permitan obtener predicciones de lluvias con anticipación con los cuales se informe a las personas los niveles de peligrosidad esperados en cada una de las calles antes que inicie el evento de lluvia.

En esta investigación se recomienda continuar con la instrumentación de cada una de las cuencas y subcuencas con lo cual se permitan realizar calibraciones particulares a partir de registros de lluvias obtenidos. De esta manera se podrá garantizar una mayor confiabilidad en la estimación de parámetros hidrológicos que simulen de una mejor manera las condiciones reales de cada uno de los arroyos.

Es necesario que la información utilizada en esta investigación tal como imágenes satelitales sean actualizadas constantemente dado el desarrollo constante de la ciudad y el cambio en los usos de suelo haciendo que cambien las condiciones hidrológicas de cada cuenca, con lo cual se deban ajustar los modelos implementados para mejorar la confiabilidad del sistema de alerta.

19 Bibliografía

- Abt, S. W. (1989). *Human Stability in a High Flood Hazard Zone*. Water Resources Bulletin, American Water Resources Association.
- Asensio, I. (s.f.). *Morfología de las cuencas hidrográficas*. Universidad Politécnica de Valencia .
- Avila, H. (2012). *Perspectiva del manejo del drenaje pluvial frente al cambio climático- Caso de estudio: Ciudad de Barranquilla, COlombia*. Barranquilla: Dossier, Uniandes.
- Bertoni, J. C. (2008). *Curso sobre gestión de inundaciones en áreas urbanas*. Global Water Partnership. Asociación Mundail del Agua - SAMTAC.
- CIOH. (2010). *Climatología de los principales puertos del Caribe colombiano - Barranquilla*. Bicentenario de la Independencia de Colombia.
- Cox, R. S. (2010). *Appropriate Safety Criteria for People in Floods*. WRL Research Report 240. Report for Institution of Engineers Australia.
- Diaz, H. A. (2014). *Estimating Effective Permeable Areas in Consolidated Urban Watersheds Based on Satellite Image Analysis and Field Survey*. ASCE.
- Durrans, H. M. (2007). *Stormwater conveyance modeling and design*. Bentley .
- Escuder, I. (2010). *Análisis y evaluación de riesgos de inundación: Estimación del impacto de medidas estructurales y no estructurales* . Valencia .
- Joanpa. (20 de August de 2013). *Joanpa.com*. Obtenido de <http://joanpa.com/news/2013/08/video-arroyo-en-barranquilla-conductor-pone-en-peligro-a-los-pasajeros/>
- Jorge Julián Vélez Upegui, A. B. (2010). *Estimación del tiempo de concentración y tiempo de rezago en la cuenca experimental urbana de la quebrada San Luis, Manizales*.
- Kellagher, R. (2008). *Developing a risk-based approach to urban flood analysis*. Edinburgh, Scotland.
- Khaliq, M. (2006). *Frequency analysis of a sequeince of dependent and/or non-stationary hydrolometeorological observations: a review*. *J. Hydrol*, 329-534-552.
- Penning-Rowell, E., Floyd, D., & Ramsbottom, P. a. (2005). *Estimating injury and loss of life in floods: A deterministic framework*. *Natural Hazards*, 36:43-64.
- Posey, S. W. (1941). *Hydraulics of steady flow in open channels* .
- Shand, T. D. (2011). *Appropriate Safety Criteria for Vehicles–Literature Review*.
- Singh, S. K. (2003). *Soil Conservation Service Curve Number (SCS - CN) Methodology* . Springer.
- Smith G P, a. W. (2012). *wo Dimensional Simulations in Urban Areas: Representation of*.

Smith, G. (2000). *ARR Project 15 2D Flood Modelling in Urban Areas* . Australian Rainfall and Runoff .

Suárez, I. M. (s.f.). *Arroyos de Barranquilla* . Recuperado el 26 de Noviembre de 2014, de <http://www.arroyosdebarranquilla.co/>

Taylor, A. y. (1952). Unit hydrograph lag and peak flow related to basin characteristics. *Amer. Geophys Union*, 235-246.

Tucci, C. E. (2007). *Gestión de Inundaciones Urbanas*. Rio Grande del Sur - Porto Alegre.

USDA. (1986). *Urban Hydrology for Small Watersheds TR-55*.