



UNIVERSITAT
POLITÈCNICA
DE VALÈNCIA

**Sistema de Alerta Temprana para la
Predicción del Nivel de Peligrosidad
en Inundaciones Pluviales
Repentinas**

TESIS DOCTORAL

Doctorado en Ingeniería Electrónica

Presentada por:

Melisa Andrea Acosta Coll

Dirigida por:

Dr. Francisco José Ballester Merelo

Dr. Marcos Martínez Peiró

Valencia, noviembre de 2018

*Y lo he llenado del Espíritu de
Dios, en sabiduría y en inteligencia,
en ciencia y en todo arte...*

(Éxodo 31:3)

AGRADECIMIENTOS

Primeramente quiero darle gracias a Dios, el centro de mi vida, por haberme dado la sabiduría e inteligencia para completar este logro. Por guiarme durante este proceso y darme las fuerzas para vencer cualquier obstáculo.

A mi esposo Carlos Daniel, gracias por tu paciencia, espera, amor y comprensión. Por apoyarme en cada sueño que tengo y ser parte de ellos. Te amo de menos infinito a más infinito.

También quiero agradecer a toda mi familia en especial a mis padres Jorge y Gladys, mi hermano, mis suegros, cuñadas y sobrinos por el apoyo y todas sus oraciones que me sostuvieron durante este tiempo.

A mis directores Paco y Marcos gracias por recibirme, guiarme, motivarme e instruirme durante este tiempo, sin su ayuda no hubiese sido posible concluir con este trabajo de tesis doctoral, mis más sinceros agradecimientos.

A todos aquellos que conocí en España e hicieron de mi estadía una experiencia inolvidable. Alice y Sara, las mejores compañeras del mundo; mis amigos del cubo, José María, Rubén, Miguel y Johan; a Paco y Cenit. Gracias por su amistad, su apoyo de cerca y a la distancia fue de gran ayuda para completar este logro.

A todo el consejo directivo de Universidad de la Costa por su apoyo incondicional durante este tiempo y por ayudarme en mi crecimiento laboral y profesional.

También agradezco de manera especial a los ingenieros Gustavo Camargo, José Arrieta y Manuel Cárdenas por brindarme sus conocimientos para conducir mi investigación.

Finalmente quiero agradecer al Departamento Administrativo de Ciencia, Tecnología e Innovación (COLCIENCIAS) en Colombia por permitirme realizar mis estudios en este prestigioso centro de educación superior como es la Universidad Politécnica de Valencia.

RESUMEN

Las inundaciones pluviales en zonas urbanas ocurren cuando lluvias intensas y de corta duración no pueden ser evacuadas lo suficientemente rápido por el sistema de drenaje o infiltrado del suelo, por lo tanto, el agua fluye hacia las calles y las estructuras cercanas. A menudo, en zonas donde el sistema de drenaje urbano es deficiente, las inundaciones pluviales se convierten en inundaciones repentinas peligrosas a los pocos minutos con altos valores de velocidad y nivel del agua. Una medida de disminución del riesgo generado por las inundaciones pluviales repentinas es la implementación de sistemas de alerta temprana para el envío de información oportuna a la comunidad en riesgo.

Esta tesis doctoral llevó a cabo el diseño e implementación de un sistema de alerta temprana (SAT) para la detección del nivel de peligrosidad de inundaciones pluviales repentinas en cuencas urbanas. El SAT desarrollado mide en tiempo real la cantidad de lluvia que cae sobre una cuenca urbana y a través de un modelo hidrológico-hidráulico estima el nivel y la velocidad del flujo en las calles. Posteriormente, estos datos son utilizados para genera las alertas de peligrosidad las cuales son visualizadas a través de una aplicación Web y enviadas por redes sociales a los usuarios suscritos.

Este sistema de alerta temprana está dividido en dos secciones: diseño del sistema y modelo hidrológico-hidráulico. El diseño del sistema describe los sistemas de adquisición de datos, comunicación, alimentación y visualización de la información. El

modelo hidrológico-hidráulico explica el proceso de transformación de la lluvia en niveles de peligrosidad y su variación espacial y temporal.

Este SAT fue implementado como ejemplo en la ciudad de Barranquilla (Colombia), el cual es la ciudad de Colombia más afectada por inundaciones pluviales repentinas, conocidas como arroyos peligrosos. Se tomó como objeto de estudio el arroyo peligroso conocido como “La 65” que tiene una longitud aproximada de 4.5 Km. Se compararon los datos nivel del agua, velocidad del agua y peligrosidad obtenida por los sensores y el modelo propuesto durante eventos de lluvia fuertes comprobando la efectividad del modelo para emitir alertas oportunas a la comunidad en riesgo.

ABSTRACT

Urban pluvial flooding occurs when intense, short-duration rainfall cannot be evacuated quickly enough through the drainage system or infiltrated into the ground; therefore, water flows into streets and nearby structures. Often, in areas where the urban drainage system is deficient, pluvial flooding become dangerous flash floods after a few minutes of rainfall with high values of water level and water velocity. A measure to reduce the risk generated by pluvial flash floods is the implementation of early warning systems to send timely information to the community at risk.

This doctoral thesis presents the design and implementation of an early warning system (EWS) for detecting the hazard level during pluvial flash floods in urban basins. The developed EWS measures in real- time the amount of rain that falls on an urban basin and through a hydrological-hydraulic model, estimates the water level and water velocity in the streets. Subsequently, these data are used to generate hazard alerts that are displayed through a Web application and sent by social networks to subscribed users.

This early warning system is divided into two sections: system design and hydrological-hydraulic model. The system design describes the systems for data acquisition, communication, power supply and information visualization. The hydrological-hydraulic model explains the process of transforming rain into hazard levels and its spatial and temporal variation.

This EWS was implemented in the city of Barranquilla (Colombia), which is the city of Colombia most affected by flash floods, known as dangerous streams. The dangerous stream known as "La 65" was selected as the study object, which has a length of 4.5 km approximately. It was compared water level, water velocity and the hazard levels values obtained by the sensors with the proposed model during heavy rain events demonstrating the model effectiveness to send timely alerts to the community at risk.

RESUM

Les inundacions pluvials en zones urbanes ocorren quan pluges intenses i de curta durada no poden ser evacuades prou ràpid pel sistema de drenatge o infiltrat del sòl, per tant, l'aigua flueix cap als carrers i les estructures properes. Sovint, en zones on el sistema de drenatge urbà és deficient, les inundacions pluvials es converteixen en inundacions sobtades perilloses als pocs minuts amb alts valors de velocitat i nivell de l'aigua. Una mesura de disminució del risc generat per les inundacions pluvials sobtades és la implementació de sistemes d'alerta primerenca per a l'enviament d'informació oportuna a la comunitat en risc.

Aquesta tesi doctoral va dur a terme el disseny i implementació d'un sistema d'alerta primerenca (SAP) per a la detecció del nivell de perillositat d'inundacions pluvials sobtades en conques urbanes. El SAP desenvolupat mesura en temps real la quantitat de pluja que cau sobre una conca urbana i a través d'un model hidrològic-hidràulic estima el nivell i la velocitat del flux en els carrers. Posteriorment, aquestes dades són utilitzades para genera les alertes de perillositat les quals són visualitzades a través d'una aplicació Web i enviades per xarxes socials als usuaris subscrits.

Aquest sistema d'alerta primerenca està dividit en dues seccions: disseny del sistema i model hidrològic-hidràulic. El disseny del sistema descriu els sistemes d'adquisició de dades, comunicació, alimentació i visualització de la informació. El model hidrològic-hidràulic explica el procés de transformació de la pluja en nivells de perillositat i la seua variació espacial i temporal.

Aquest SAP va ser implementat com a exemple en la ciutat de Barranquilla (Colòmbia), el qual és la ciutat de Colòmbia més afectada per inundacions pluvials sobtades, conegudes com a rierols perillosos. Es va prendre com a objecte d'estudi el rierol perillós conegut com "La 65" que té una longitud aproximada de 4.5 Km. Es van comparar les dades nivell de l'aigua, velocitat de l'aigua i perillositat obtinguda pels sensors i el model proposat durant esdeveniments de pluja fortes comprovant l'efectivitat del model per a emetre alertes oportunes a la comunitat en risc.

ÍNDICE

ÍNDICE DE FIGURAS	2
ÍNDICE DE TABLAS	5
Capítulo 1: Introducción.....	7
1.1 Motivación e interés del tema.....	7
1.2 Objetivos.....	9
1.3 Estructura de la tesis	10
Capítulo 2: Marco teórico y estado del arte	13
2.1 Conceptos hidrológicos e hidráulicos	14
2.2 Criterios de detección del nivel de peligrosidad para peatones y vehículos.....	31
2.3 Estado del arte.....	37
Capítulo 3: Metodología.....	61
3.1 Descripción del caso de estudio	62
3.2 Levantamiento de topografía y <i>site survey</i>	66
3.3 Diseño de la red.....	72
3.4 Modelo hidrológico e hidráulico.....	93
Capítulo 4: Resultados	106
4.1 Evento 1.....	107
4.2 Evento 2.....	116
Capítulo 5: Conclusiones.....	129
Capítulo 6: Trabajos futuros, colaboraciones y líneas de investigación derivadas, publicaciones.	135
6.1 Trabajos futuros	135
6.2 Colaboraciones.....	136
6.3 Líneas de investigación derivadas de la tesis	141
6.4 Publicaciones realizadas.....	144
REFERENCIAS.....	145
ANEXOS.....	151
A. Levantamiento de topografía	151
B. Código python.	153
C. Artículo 1.....	155
D. Artículo 2	195

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 2. 1 a) Cuenca endorreica b) Cuenca exorreica [6].....	15
Figura 2. 2 Sección transversal típica de un calle [10].....	18
Figura 2. 3 Elementos del Hidrograma [6].....	24
Figura 2. 4 Principio de proporcionalidad. [5]	26
Figura 2. 5 Superposición de hidrogramas [5]	26
Figura 2. 6 Hidrograma adimensional SCS [5]	28
Figura 2. 7 Solución de las ecuaciones de escorrentía SCS [9].....	29
Figura 2. 8 Modelo Físico [19].....	34
Figura 2. 9 Nivel de peligrosidad ($v_y = 0.22 \text{ m}^2/\text{s}$) y zona estable para peatones [19].....	35
Figura 2. 10 Arquitectura General [1]	46
Figura 2. 11 Arquitectura general del sistema en Génova.....	49
Figura 2. 12 Diagrama general del sistema [49].....	52
Figura 2. 13 Arquitectura general del Sistema de Alerta Temprana [34].....	57
Figura 2. 14 Estructura general de los sistemas de alerta temprana revisados	59
Figura 3. 1 Arroyo peligroso 1 en Barranquilla.....	63
Figura 3. 2 Arroyo peligroso 2 en Barranquilla.....	63
Figura 3. 3 Vehículos arrastrados por arroyo peligroso carrera 43 en Barranquilla	64
Figura 3. 4 Cuenca y recorrido del arroyo La 65 (Acosta-Coll et.al, 2018).....	65
Figura 3. 5 Perfil longitudinal del arroyo La 65 [57]	67
Figura 3. 6 Especificaciones de instalación de conexión	69
Figura 3. 7 Vista superior de especificaciones de conexión en poste en poste de energía	70
Figura 3. 8 Proceso de instalación.....	71
Figura 3. 9 Punto 1	71
Figura 3. 10 Punto 2	72
Figura 3. 11 Punto 3	72
Figura 3. 12 Diagrama de bloques arquitectura de la red.....	74
Figura 3. 13 Arquitectura general.....	75

Figura 3. 14 Descripción TOP-DOWN de la estructura de los nodos	75
Figura 3. 15 Estructura TOP-DOWN sistema de adquisición de datos.....	76
Figura 3. 16 Gateway GW-LP-01.....	77
Figura 3. 17 Pluviómetro RAINPROF	79
Figura 3. 18 Sensor de nivel VEGAPLUS WL-61.....	80
Figura 3. 19 Descripción TOP-DOWN para la plataforma de comunicaciones	81
Figura 3. 20 Interfaz gráfica software GREE WEB MANAGER 2.0	83
Figura 3. 21 Datos del nodo de cada sensor	84
Figura 3. 22 Datos almacenados en un período de tiempo	84
Figura 3. 23 Sistema de alimentación de un nodo.	85
Figura 3. 24 Interfaz gráfica plataforma de visualización	89
Figura 3. 25 Información de nivel de peligrosidad en punto de observación.....	90
Figura 3. 26 Información de los pluviómetros	90
Figura 3. 27 Suscripción para recibir notificaciones del estado del arroyo.....	91
Figura 3. 28 Información de variables atmosféricas.....	92
Figura 3. 29 Polígonos de las sub-cuencas [64]	97
Figura 3. 30 Visor del Instituto Geográfico Agustín Codazzi (IGAC).....	98
Figura 3. 31 Hidrograma unitario sintético SCS [57].....	100
Figura 3. 32 Hidrogramas unitarios de la lluvia [57]	101
Figura 3. 33 Hidrogramas acumulativos [57].....	102
Figura 3. 34 Valores del hidrograma t1 para análisis de flujo constante [57]	103
Figura 3. 35 Condiciones de frontera aguas arriba y aguas abajo [57].....	104
Figura 3. 36 Tabla de salida de variación del nivel y velocidad del agua.....	104
Figura 4. 1 Hidrogramas unitarios sintéticos Evento 1	109

Figura 4. 2 Hidrogramas acumulado Evento 1	110
Figura 4. 3 Comparación nivel de agua Evento 1 Nodo 1 [64]....	111
Figura 4. 4 Comparación nivel de agua Evento 1 Nodo 3 [64]....	112
Figura 4. 5 Comparación velocidad de agua Evento 1 Nodo 1 [64]	112
Figura 4. 6 Comparación velocidad de agua Evento 1 Nodo 3 [64]	113
Figura 4. 7 Nivel de peligrosidad Nodo 1 Evento 1 [64]	114
Figura 4. 8 Nivel de peligrosidad Nodo 3 Evento 1 [64]	114
Figura 4. 9 Hidrograma unitario sintético Evento 2	119
Figura 4. 10 Hidrograma acumulado Evento 2.....	119
Figura 4. 11 Comparación nivel de agua Evento 2 Nodo 1 [64]..	120
Figura 4. 12 Comparación nivel de agua Evento 2 Nodo 3 [64]..	120
Figura 4. 13 Caudal máximo en las secciones antes del desbordamiento [64].....	122
Figura 4. 14 Comparación velocidad de agua Evento 2 Nodo 1 [64]	122
Figura 4. 15 Comparación velocidad de agua Evento 2 Nodo 3 [64]	123
Figura 4. 16 Nivel de peligrosidad Evento 2 Nodo 1 [64]	124
Figura 4. 17 Nivel de peligrosidad Evento 2 Nodo 3 [64]	124
Figura 4. 18 Acercamiento nivel de peligrosidad Evento 2 Nodo 1	126
Figura 4. 19 Acercamiento nivel de peligrosidad Evento 2 Nodo 3	127
Figura 5. 1 Sistema de Alerta Temprana Propuesto	132
Figura 6. 1 Visita a instalaciones del radar Doppler-Polarimétrico de la UPRM.....	138
Figura 6. 2 Torre y cuarto de control del radar UPRM	139
Figura 6. 3 Participación ponente internacional seminario técnico	140
Figura 6. 4 Certificado de participación seminario técnico.....	140

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 2. 1 Clasificación de lluvia según su intensidad [8]	16
Tabla 2. 2 Características geométricas de una sección transversal de un canal abierto.....	17
Tabla 2. 3 Coeficientes de rugosidad de Manning [9].....	22
Tabla 2. 4 Elementos de un hidrograma	25
Tabla 2. 5 Coordenadas del hidrograma SCS [5]	28
Tabla 2. 6 Clasificación de clases antecedentes de humedad (AMC) para el método de abstracciones de lluvia del SCS [13].....	30
Tabla 2. 7 Criterios para el nivel de agua máximo permitido en las calles	32
Tabla 2.8 Criterios que consideran la acción conjunta entre el nivel del agua y la velocidad	33
Tabla 2. 9 Clasificación de carros y relación nivel-velocidad.....	36
Tabla 2. 10 Elementos clave y actores clave de un sistema de alerta temprana	45
Tabla 3. 1 Características técnicas del Gateway GW-LP-01.....	78
Tabla 3. 2 Características de consumo de los elementos de un nodo	86
Tabla 3. 3 Consumo total del sistema (24/7)	87
Tabla 3. 4 Características de consumo de la batería.....	88
Tabla 3. 5 Características técnicas del panel solar	88
Tabla 4. 1 Precipitación Evento 1	107
Tabla 4. 2 Variables físicas de las secciones transversales del nodo 1 y 3	108
Tabla 4. 3 Valores de nivel y velocidad del agua medidos Evento 1	108
Tabla 4. 4 Valores de nivel y velocidad del agua obtenidos por el modelo para el Evento 1	110
Tabla 4. 5 Precipitación Evento 2.....	116

Tabla 4. 6 Valores de nivel y velocidad del agua medidos Nodo 1 (Evento 2)	117
Tabla 4. 7 Valores de nivel y velocidad del agua medidos Nodo 3 (Evento 2)	118

Capítulo 1: Introducción

1.1 Motivación e interés del tema

Las inundaciones repentinas en zonas urbanas son generadas por la alta intensidad y duración de los eventos de lluvia que saturan los sistemas de drenaje urbano. Acciones antrópicas como la pavimentación de los suelos, la impermeabilización de techos y la reducción de zonas verdes disminuyen la absorción del agua y tienden a aumentar los niveles de escorrentía durante las tormentas. [1] [2]. Este tipo de inundaciones tienen impactos negativos en la vida, el trabajo, los negocios y la infraestructura de la población en riesgo y son uno de los peligros más letales en todo el mundo. Las inundaciones repentinas tienen menor impacto económico que las inundaciones costeras y fluviales, pero son más frecuentes [3].

Para minimizar el daño resultante de las inundaciones repentinas, en términos de tasas de mortalidad y lesiones, primeramente se deben identificar los factores causales y luego establecer estrategias para mitigar su impacto en los humanos [4]. Asimismo, es necesario implementar sistemas que alerten a la comunidad sobre el peligro de estas inundaciones y puedan tomar decisiones oportunas. La ciudad más afectada en Colombia (América del Sur) con inundaciones urbanas es Barranquilla. Esta ciudad carece de un sistema de

drenaje de aguas pluviales; por lo tanto, durante las fuertes lluvias, las inundaciones repentinas se forman rápidamente. Algunas inundaciones repentinas en Barranquilla comúnmente llamadas arroyos, han sido identificadas como peligrosas, debido a la cantidad de muertes por ahogamiento, arrastre y vuelco de vehículos. Las autoridades han implementado algunas medidas para adaptarse a los arroyos, como la instalación de señales de advertencia para las corrientes más peligrosas, pero esto no ha sido suficiente para reducir el impacto negativo en la sociedad. En los últimos años, se han llevado a cabo obras públicas para canalizar algunos de los arroyos más peligrosos, que es una solución estructural de alto costo y largo plazo para mitigar el problema. Sin embargo, la ciudad está experimentando un rápido crecimiento urbano con la construcción de nuevas carreteras, la urbanización de tierras y la reducción de áreas verdes, todo lo cual conduce al desarrollo de nuevas corrientes peligrosas.

La presente tesis es una investigación para establecer un diseño eficiente y posteriormente implementar un sistema de alerta temprana para detectar el nivel de peligrosidad de un arroyo peligroso en la ciudad de Barranquilla y en general cualquier área urbana sometida a intensa precipitación estacional. El objetivo de este SAT es advertir a la comunidad del peligro de ser arrastrada por la corriente durante los eventos de lluvia. Como primera medida se identificaron las variables hidrológicas e hidráulicas que influyen en la pérdida de la estabilidad de peatones y vehículos al intentar cruzar los arroyos o también aquellos que son sorprendidos por las corrientes peligrosas. Debido a que estos arroyos tienen longitudes

de varios kilómetros, para poder emitir alertas es necesario instalar un sin número de equipos de medición a lo largo del trayecto del arroyo lo que convertiría el SAT en una solución de alto costo. Es por esto que la presente tesis doctoral desarrolla un modelo que brinda información de peligrosidad en todas las secciones transversales del arroyo de estudio con la menor cantidad de equipos posibles.

1.2 Objetivos

Objetivo general

Desarrollar un Sistema de Alerta Temprana óptimo para la predicción del nivel de peligrosidad de una inundación repentina en zonas urbanas producidas por lluvias intensas. Aplicación a la ciudad de Barranquilla (Colombia).

Objetivos específicos

- Determinar el modelo hidrológico con base a las propiedades físico-hidráulicas del canal, para la predicción de la variación en espacio y tiempo del caudal y el nivel de la lámina de agua durante un evento de lluvia.
- Calibrar y validar el modelo hidrológico de un arroyo en particular, “La 65”.

- Establecer la alerta del nivel de peligrosidad y el tiempo crítico de respuesta.
- Parametrizar los elementos del modelo completo para trasladarlo a otros arroyos adyacentes de la misma ciudad o de otros núcleos urbanos de características parecidas

1.3 Estructura de la tesis

Esta tesis doctoral se ha estructurado en seis capítulos y cuatro anexos, una breve descripción de cada capítulo y de los anexos se muestra a continuación.

El capítulo 2 está dividido en tres secciones. La primera sección describe los conceptos teóricos utilizados para el desarrollo del modelo para la transformación de la lluvia en niveles de peligrosidad. La segunda sección presenta los criterios sobre la detección del nivel de peligrosidad de inundaciones en zonas urbanas. La tercera sección presenta el estado del arte para el diseño de sistemas de alertas tempranas efectivas durante inundaciones repentinas.

El capítulo 3 constituye el núcleo central de la Tesis Doctoral y es aquí donde se explica la metodología para el diseño de un sistema de alerta temprana que alerte a la comunidad sobre el estado de peligrosidad de una inundación pluvial repentina. En primer lugar, se describe el caso de estudio y las características de la cuenca donde se encuentra el arroyo peligroso seleccionado. En las siguientes secciones, se describe de forma detallada, el diseño del sistema de alerta temprana. Este está subdividido en 4 sistemas:

adquisición de datos, transmisión de datos, alimentación y visualización de la información. En la última sección se describe el modelo hidrológico-hidráulico propuesto para transformar la cantidad de lluvia en niveles de peligrosidad y cómo estos niveles varían a lo largo del arroyo y durante el evento de lluvia.

El capítulo 4 presenta la aplicación de la metodología del capítulo anterior a un arroyo en particular. Realizamos la comparación entre los valores de velocidad del agua, nivel del agua y peligrosidad medido con los sensores con los resultados obtenidos por el modelo propuesto en diferentes secciones transversales del arroyo La 65. Para ello, se tomaron muestras durante dos eventos de lluvia muy fuertes, con diferentes intensidades y duración para comprobar la efectividad del modelo propuesto.

El capítulo 5 presenta las principales conclusiones obtenidas con el desarrollo de esta tesis doctoral. Asimismo, se muestra la contribución metodológica para el diseño de sistemas de alertas tempranas efectivas que disminuyen/minimizan el riesgo asociado a las inundaciones pluviales repentinas en zonas urbanas.

Finalmente, el capítulo seis presenta una sección de trabajos futuros donde se exponen posibles líneas de investigación en relación a las propuestas presentadas. La tesis doctoral cuenta con anexos que se han considerado importantes añadir, descritos a continuación.

El anexo A muestra el levantamiento de topografía realizado a lo largo del arroyo peligroso “La 65” en la ciudad de Barranquilla. Esta información fue utilizada para crear la geometría del canal en el software HEC-RAS.

El anexo B enseña el código desarrollado en el lenguaje de programación Python para el cálculo de la precipitación neta y la variación del caudal par cada registro de lluvia medido por los pluviómetros.

El anexo C presenta un artículo de revisión para el diseño de sistemas de alertas tempranas para inundaciones pluviales repentinas en tiempo real donde se describe detalladamente los elementos claves que conforman un SAT efectivo durante las inundaciones repentinas. A través de la revisión de proyectos implementados a nivel mundial se determinan los instrumentos de medición, protocolos de comunicación y medios más empleados para el envío de las alertas a la comunidad en riesgo. Este artículo fue publicado en la revista *Sensors*, 2018, Volumen 18, Issue 2255.

El anexo D presenta un artículo de los resultados obtenidos en el desarrollo de este proyecto describiendo un sistema de alerta temprana de bajo costo para alertar peatones y conductores sobre el estado de peligrosidad de un arroyo peligroso durante los eventos de lluvia. Este artículo fue publicado en la revista *Natural Hazards*, junio 2018, Volumen 92, Issue 2, pp 1237–.

Capítulo 2: Marco teórico y estado del arte

Este capítulo se encuentra dividido en tres secciones. La primera sección presenta los conceptos hidrológicos e hidráulicos utilizados para el desarrollo del modelo que permite la transformación de la lluvia medida en niveles de peligrosidad para peatones y vehículos. La segunda sección describe las teorías y proyectos desarrollados para la detección del nivel de peligrosidad en zonas urbanas. En esta segunda sección se define cuál es el criterio de peligrosidad asignado en esta investigación junto con su justificación. Finalmente, la tercera sección presenta el estado del arte desarrollado a través de una revisión sistemática de la literatura para definir la estructura básica de un sistema de alerta temprana efectiva durante las inundaciones repentinas. En el Anexo C se encuentra el artículo de revisión publicado en la revista Sensors que propone la estructura básica de un sistema de alerta temprana en tiempo real para inundaciones pluviales repentinas en zonas urbanas basado en la revisión de literatura.

2.1 Conceptos hidrológicos e hidráulicos

Los fenómenos hidrológicos son fenómenos naturales complejos asociados a cualquier tipo de precipitación. Debido a que estos fenómenos son difíciles de comprender en su totalidad, se pueden representar como sistema, que corresponde un conjunto de partes que se conectan entre sí, y forman un todo. El ciclo hidrológico es un sistema que está compuesto por diferentes fases tales como, evaporación, condensación, precipitación, infiltración, escorrentía, entre otras fases [5]. El objetivo del estudio del sistema hidrológico es analizar cómo opera el sistema y poder predecir su salida.

Para el estudio del proceso de lluvia-escorrentía, se aplican tanto modelos estadísticos como modelos empíricos. Los modelos estadísticos están basados en el análisis de frecuencia acumulada de las escorrentías. En cambio, los modelos empíricos, son métodos desarrollados a través de la experiencia, en donde se relacionan parámetros físicos e hidrológicos para poder estimar la escorrentía asociada a una determinada lluvia. A continuación se definirán diferentes términos que fueron empleados para el desarrollo del modelo hidrológico-hidráulico.

2.1.1 Cuenca

Una cuenca es una zona de la superficie terrestre donde el agua que cae sobre ella por precipitación se escurre a un punto común de salida. También se define como la unión de un sistema de recursos de ríos de agua definidos por un relieve. De acuerdo al tipo de salida, una cuenca se puede clasificar en endorreicas, exorreicas y arreicas [6]. Las cuencas exorreicas el punto de salida está dentro de los límites de la cuenca y drenan sus aguas al mar o al océano; las cuencas endorreicas drenan sus aguas a lagos, lagunas, o cuerpos de agua que no tienen comunicación con el mar. En las cuencas arreicas el agua se evapora o se filtra en el terreno antes de dirigirse a una red de drenaje. La figura 2.1 muestra un ejemplo de una cuenca endorreica y una cuenca exorreica.

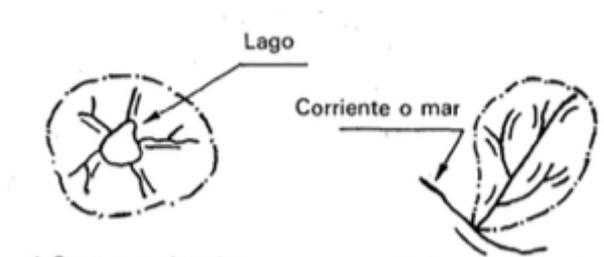


Figura 2. 1 a) Cuenca endorreica b) Cuenca exorreica [6]

2.1.2 Precipitación

La precipitación se define como toda fuente de humedad que se origina en las nubes y llega a la superficie terrestre. La evaporación desde la superficie de los océanos se constituye como la principal

fuelle de humedad para la precipitación, pero factores del clima tales como la latitud, altitud, las barreras orográficas, continentalidad, corrientes marinas y los vientos son los que determinan la humedad en una zona [7].

Existen diferentes instrumentos para la medición de la precipitación, los más empleados son los pluviómetros. Dentro de los pluviómetros encontramos los pluviómetros simples o manuales y pluviómetros totalizadores. Los pluviómetros simples son empleados para medir la cantidad de precipitación caída en un lugar y durante tiempo determinado y las unidades se expresan en milímetro de altura (mm). Normalmente la lectura se realiza cada 12 horas. Un litro de agua caído sobre un metro cuadrado es equivalente a 1 milímetro (1 mm). Los pluviómetros totalizadores se utilizan cuando se quiere conocer la pluviometría mensual o estacional. La Tabla 2.1 muestra la clasificación de las lluvias según su intensidad.

Tabla 2. 1 Clasificación de lluvia según su intensidad [8]

CLASE	INTENSIDAD MEDIA EN UNA HORA (mm/h)
Débiles	≤ 2
Moderada	>2 y ≤ 15
Fuertes	>15 y ≤ 30
Muy fuertes	>30 y ≤ 60
Torrenciales	>60

2.1.3 Flujo superficial en canales abierto

Un canal abierto es un conducto natural o artificial se caracteriza por la exposición de una superficie libre a la presión atmosférica y por donde fluye un líquido por la acción de la fuerza de gravedad [9]. Las propiedades hidráulicas de los canales naturales por lo general son irregulares, pero en algunos son basados en estudios empíricos resultado de experiencias realizadas en diferentes canales con características similares. Para el estudio de canales abiertos naturales se requiere también aplicar conocimientos en hidrología, transporte de sedimentos, entre otros. Los canales artificiales son aquellos construidos bajo la intervención humana, tales como canales de navegación, canales y canaletas de irrigación, vertederos, carreteras, entre otros, tales como también modelos construidos en laboratorios con fines experimentales. La tabla 2.2 define las características físico-hidráulicas de un canal.

Tabla 2. 2 Características geométricas de una sección transversal de un canal abierto

Característica	Definición
Nivel- Calado – Tirante (y)	Es la altura de la lámina de agua en una sección transversal. Se mide con respecto a un plano de referencia que usualmente en la cota inferior de la sección transversal
Ancho superior de la sección (L)	Se define como la anchura de la superficie libre de fluido en el canal.
Área mojada (A).	Es la superficie de la sección transversal que ocupa el agua.
Calado medio (y_m).	Es el cociente entre el área mojada del canal y la anchura superior de la sección (A/L).

Perímetro mojado.	Es la longitud de la pared del canal que está en contacto con el agua.
Radio hidráulico (Rh).	Es la relación existente entre el área mojada y el perímetro mojado del canal (A/P).
Pendiente del canal (I) - (S_0).	Se define como la altura que desciende el canal por metro lineal, se puede expresar en % y en tanto por mil.

En zonas urbanas las secciones transversales de las calles están compuestas por los siguientes elementos: la línea de edificación, la acera o vereda, el bordillo o cordón y la calzada (figura 2.2).

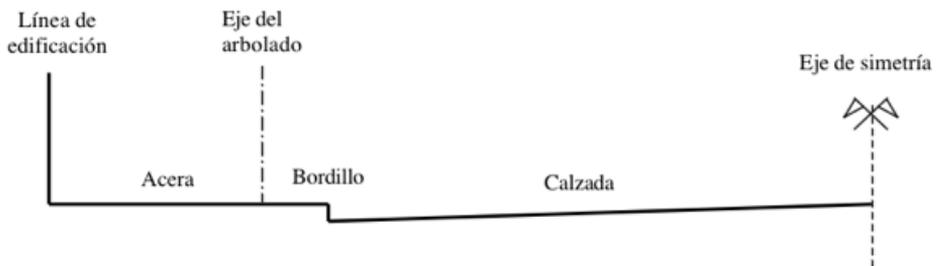


Figura 2. 2 Sección transversal típica de un calle [10]

2.1.4 Tipos de flujo

El tipo de flujo en canales abiertos se puede clasificar de acuerdo a su variación en el tiempo y el espacio [5] .

El tiempo como criterio:

a) Flujo permanente: La profundidad del flujo no cambia o es constante durante un lapso de tiempo en consideración. Un ejemplo

de este flujo es aquel que en cualquier sección transversal el gasto es el mismo.

b) Flujo no permanente: La profundidad del flujo cambia con respecto al tiempo.

El espacio como criterio:

a) Flujo uniforme: Tanto la profundidad del flujo es y la velocidad media permanece constante en cualquier sección del canal. Este tipo de flujo solo puede satisfacer en canales prismáticos, de manera que solo se puede presentar en canales artificiales, y no en canales naturales.

b) Flujo Variado: La profundidad del flujo cambia a lo largo del canal.

- Flujo gradualmente variado.

- Rápidamente variado: La profundidad del agua de manera abrupta en distancias comparativamente cortas.

2.1.5 Estado de flujo.

El estado o comportamiento de un flujo en un canal abierto depende de la relación entre la viscosidad y la gravedad relativa con respecto a las fuerzas de inercia del flujo [5]

Efecto de viscosidad

Existen dos tipos de flujo de acuerdo al efecto de la viscosidad relativa sobre la inercia, el flujo puede clasificarse en laminar o turbulento [5]. El flujo es *laminar* si las partículas describen una trayectoria suave y definida o forman líneas de corriente. El flujo es *turbulento* si al aumentar el gradiente de velocidad, las partículas pierden su trayectoria, chocan entre sí y no siguen una trayectoria definida. En este tipo de flujo el efecto de la viscosidad es despreciable [11].

Efecto de la gravedad

De acuerdo al efecto de la gravedad el flujo se clasifica en supercrítico y subcrítico. El flujo *supercrítico*, la velocidad es alta y se describe como rápido, ultrarrápido y torrencial. El *flujo subcrítico*, la velocidad del flujo es baja y se describe como tranquilo y de corriente lenta [5].

2.1.6 Ecuación de Manning

El ingeniero irlandés Robert Manning en 1889 presentó su ecuación basada en los experimentos de Bazin, a partir de siete ecuaciones diferentes y fue probada en 170 observaciones [9]. La ecuación se expresa de la siguiente forma:

$$V = \frac{1}{n} R_H^{2/3} * S^{1/2}$$

$$Q = \frac{1}{n} A R_H^{2/3} * S^{1/2}$$

Donde:

V = velocidad media [m/s]

R_H = Radio hidráulico [m]

S = pendiente del canal [m/m]

n = coeficiente de rugosidad de Manning.

A = área de la sección del flujo

Q = caudal del agua [m³/s].

La Tabla 2.3 muestra los coeficientes de rugosidad *n* de Manning teniendo en cuenta el tipo de canal.

Tabla 2. 3 Coeficientes de rugosidad de Manning [9]

Tipo de canal	Coefficient e (n)	Tipo de canal	Coefficiente (n)
I. Conductos parcialmente llenos		II. Canales abiertos revestidos o acueductos	
Acero	0.012	Metal	0.013
Fundición	0.014	Cemento	0.011
Vidrio	0.01	Mortero	0.013
Cemento	0.011	Hormigón acabado a llana	0.013
Mortero	0.013	Hormigón acabado en bruto	0.017
Hormigón	0.014	Gunita	0.022
Cerámico	0.015	Ladrillo	0.015
Ladrillo	0.025	Mapostería	0.025
Mapostería	0.025		
III. Canales excavados		IV. Cauces naturales	
Tierra canal recto	0.022	Ríos de meseta rectos sin ollas	0.03
Grava canal recto	0.025	Ríos de meseta con curvas, piedras y vegetación	0.04
Tierra canal con curvas	0.025	Anterior con ollas y maleza	0.07
Tierra canal con curvas y vegetación	0.03		
Tierra canal con curvas y mucha vegetación	0.035	Ríos de montaña	0.04
Excavación en roca	0.035		
V. Cauces naturales en avenidas			
Inundaciones en pastizales	0.03		
Sobre sembrados no nacidos	0.03		
Sobre sembrados nacido	0.04		
Sobre monte bajo	0.06		
Sobre bosques	0.07		

2.1.7 Ecuaciones de Saint-Venant

Las ecuaciones de Saint-Venant conforman un conjunto de ecuaciones diferenciales en un espacio unidimensional aplicado a canales abiertos. Estas ecuaciones describen el movimiento del agua, y se modelan los cambios de caudal y nivel y el tiempo de manera no permanente.

Las ecuaciones de Saint-Venant parten de los siguientes supuestos [12]:

- a) La profundidad y la velocidad de flujo solamente varía en la dirección longitudinal del canal.
- b) Las variaciones de profundidad y velocidad se realizan de manera gradual a lo largo del canal.
- c) La pendiente debe ser pequeña.
- d) No existe erosión ni acreción en el lecho.
- e) La resistencia puede ser calculada a partir de los modelos de flujo uniforme permanente.

Las ecuaciones de Saint-Venant han sido verificadas a través de diferentes observaciones y experimentos. Para aplicaciones prácticas, debido a la complejidad matemática, la solución de estas ecuaciones se hace a través de métodos de pasos aproximados o basado en suposiciones simplificadas.

2.1.8 Hidrogramas

La variación del caudal de escorrentía con respecto al tiempo a menudo se representa a través de un hidrograma, el cual es una curva que se obtiene al graficar el caudal contra el tiempo. Asimismo, los hidrogramas pueden ser gráficas de nivel o velocidad de flujo contra el tiempo [5]. Existen dos tipos de hidrogramas, el hidrograma anual y el de evento. El hidrograma anual es la gráfica que relaciona la variación del caudal para un período de un año [6]. La figura 2.3 ilustra los elementos de un hidrograma y la Tabla 2.4 define cada uno de ellos.

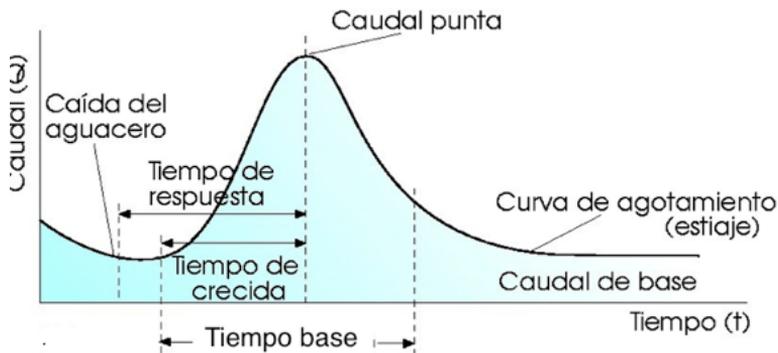


Figura 2. 3 Elementos del Hidrograma [6]

Tabla 2. 4 Elementos de un hidrograma

Elemento	Definición
Tiempo de crecida o tiempo pico (t_p)	Es el tiempo que transcurre desde el punto de levantamiento hasta el pico del hidrograma
Tiempo base (t_b)	Es el tiempo que transcurre desde el punto de levantamiento hasta el punto final del escurrimiento directo. Es el tiempo total del escurrimiento
Precipitación efectiva (Pe)	Es la porción de la precipitación que se transforma en escurrimiento.
Duración de la precipitación efectiva (D)	Es el tiempo transcurrido entre el inicio y el final de la lluvia efectiva se denomina.
Abstracciones iniciales (Ia)	Es la porción de la precipitación que ocurre antes del inicio de la escorrentía.
Tiempo de respuesta o retardo (t_r)	Es el tiempo entre la mitad de la duración de la lluvia efectiva y el tiempo pico.
Tiempo de concentración (t_c)	Es el tiempo necesario para que una gota de agua que cae en el punto hidrológicamente más alejado de aquella llegue a la salida

Dos eventos de lluvia con intensidad neta uniforme que tienen la misma duración, pero con volúmenes diferentes, producen caudales proporcionales a dichos volúmenes. Por lo tanto, las ordenadas de los hidrogramas son proporcionales entre sí. La figura 2.4 presenta el principio de proporcionalidad.

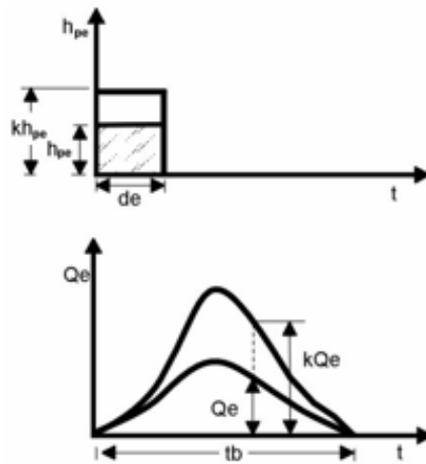


Figura 2. 4 Principio de proporcionalidad. [5]

El hidrograma que resulta de un período de lluvia dado es independiente a la escorrentía concurrente de otros períodos, de manera que puede superponerse a hidrogramas de eventos de lluvia precedentes. La figura 2.5 ilustra la superposición de hidrogramas.

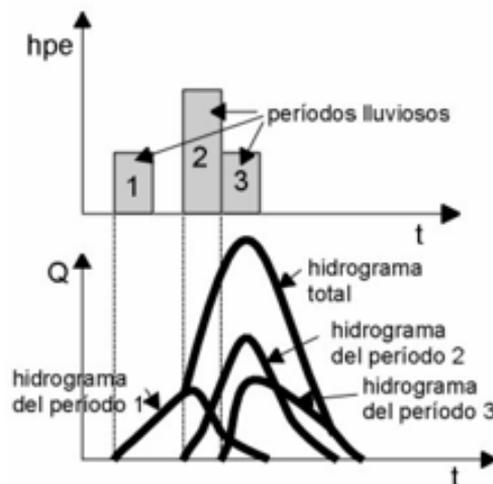


Figura 2. 5 Superposición de hidrogramas [5]

Para la construcción de un hidrograma unitario es necesario tener los registros de precipitación y escurrimiento. Sin embargo, la mayor parte de las cuencas, no cuentan con instrumentos la medición de las precipitaciones y el caudal; por ello, es conveniente contar con métodos con los que se puedan obtener hidrogramas unitarios teniendo en cuenta características generales de la cuenca. Este tipo de hidrogramas se les conoce como hidrogramas sintéticos.

Hidrograma Unitario Adimensional del SCS (Soil Conservation Service)

El SCS desarrolló un hidrograma adimensional teniendo en cuenta el estudio de diferentes hidrogramas en diferentes cuencas, en donde se divide la escala de caudales entre el valor de caudal pico (Q_p) y la escala del tiempo entre el tiempo al que se presenta el pico (t_p). La figura 2.6 muestra el hidrograma adimensional y la tabla 2.5 muestra las coordenadas.

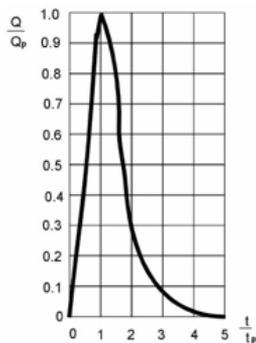


Figura 2. 6 Hidrograma adimensional SCS [5]

Tabla 2. 5 Coordenadas del hidrograma SCS [5]

t/tp	Q/Qp	t/tp	Q/Qp
0.00	0.000	1.40	0.750
0.10	0.015	1.50	0.650
0.20	0.075	1.60	0.570
0.30	0.160	1.80	0.430
0.40	0.280	2.00	0.320
0.50	0.430	2.20	0.240
0.60	0.600	2.40	0.180
0.70	0.770	2.60	0.130
0.80	0.890	2.80	0.098
0.90	0.970	3.00	0.075
1.00	1.000	3.50	0.036
1.10	0.980	4.00	0.018
1.20	0.920	4.50	0.009
1.30	0.840	5.00	0.004

2.1.9 Cálculo de la precipitación neta mediante el método del Soil Conservation Service

El SCS hoy actualmente como NRCS (National Resources Conservation Service), elaboró un método donde la precipitación efectiva P_e puede calcularse de la siguiente forma

$$P_e = \frac{(P-0.2S)^2}{(P+0.8S)} \quad (1)$$

Donde

P_e = Precipitación efectiva (in)

P = Precipitación registrada (in)

S = Retención máxima potencial después de que comience la
escorrentía (in)

S depende de las condiciones del suelo y la cubierta de la cuenca
hidrográfica de acuerdo al número de curva (CN). CN tiene un
rango de 0 a 100, y S está relacionado con CN por:

$$S = \frac{1000}{CN} - 10 \quad (2)$$

Al representar gráficamente P_e y P para muchas cuencas, el S.C.S
encontró una serie de curvas como se muestra en la figura 2.7.

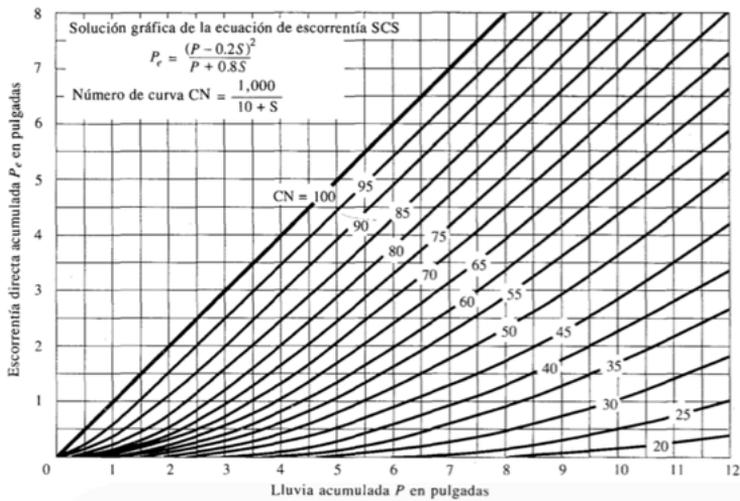


Figura 2. 7 Solución de las ecuaciones de escorrentía SCS [9]

Para estandarizar estas curvas, se definió un número adimensional
llamado el número de curva CN , de manera que $0 \leq CN \leq 100$ [9].

Para superficies impermeables CN=100; para superficies naturales CN<100.

El número de curva (CN) y el potencial máximo de retención (S) se relacionan como

$$S = \frac{1000}{CN} - 10$$

Los números de curva de la figura anterior se deben aplicar teniendo en cuenta las condiciones de antecedentes de humedad (AMC, average moisture condition). Para condiciones seca AMC I, condiciones normales AMC II y para condiciones húmedas AMC III. La Tabla 2.6 muestra los valores de AMC para las diferentes condiciones.

Tabla 2. 6 Clasificación de clases antecedentes de humedad (AMC) para el método de abstracciones de lluvia del SCS [13]

Grupo AMC	Lluvia antecedente de 5 días (pulg.)	
	Estación Inactiva	Estación de crecimiento
I	Menor que 0.5	Menor que 1.4
II	0.5 a 1.1	1.4 a 2.1
III	Sobre 1.1	Sobre 2.1

De acuerdo a la tabla anterior, los número de curva pueden calcularse como

$$CN(I) = \frac{4.2 CN(II)}{10 - 0.058CN(II)}$$

y

$$CN(III) = \frac{23CN(II)}{10 + 0.13CN(II)}$$

Con base al tipo del suelo y al uso de la tierra, el SCS ha definido cuatro grupos para los número de curva [9]:

- Grupo A: Arena profunda, suelos profundos depositados por el viento, limos agregados.
- Grupo B: Suelos poco profundos depositados por el viento, marga arenosa.
- Grupo C: Margas arcillosas, margas arenosas poco profundas, suelos con bajo contenido orgánico y suelos con altos contenidos de arcilla.
- Grupo D: Suelos que se expande significativamente cuando se mojan, arcillas altamente plásticas y ciertos suelos salinos.

2.2 Criterios de detección del nivel de peligrosidad para peatones y vehículos

Durante los eventos de alta precipitación lo más importante es proteger la vida de los ciudadanos. Asimismo, es necesario proporcionar un sistema de drenaje eficiente para garantizar que no haya inundaciones en las propiedades y un flujo vehicular [14]. Los parámetros hidráulicos, como el nivel del agua, la velocidad y la

combinación de ambos parámetros, se deben monitorizar y mantener por debajo de los umbrales. Si estos parámetros superan los niveles de seguridad, un sistema de advertencia (alarma) debe advertir a la comunidad sobre el peligro inminente.

Actualmente, hay pocas referencias de proyectos para establecer el nivel de peligrosidad de las inundaciones pluviales repentinas y de cuáles son las variables que influyen en la pérdida de la estabilidad de los peatones y vehículos expuestos a este tipo de inundaciones.

En [15] se describen dos tipos de criterios para determinar el nivel de peligrosidad de una corriente para peatones. El primer grupo está relacionado con el nivel de agua máximo permitido en las calles antes de que el agua entre en edificios y viviendas. La Tabla 2.7 ilustra los criterios en este grupo.

Tabla 2. 7 Criterios para el nivel de agua máximo permitido en las calles

Fuente	y_{max} (m)	Descripción
Urban Storm Drainage Criteria Manual. Urban Drainage and Flood Control District. Denver, Colorado (USA) [14]	0.45	Aplicado a áreas urbanas. La dimensión de los edificios por debajo de este valor (0,45 m) debe tomar medidas de protección contra inundaciones
Road Drainage Manual, National Transport Commission (Republic of South Africa) [16]	0.3-0.7	Aplicado para áreas rurales
Clark County [17]	0.3	Aplicado a áreas urbanas. Establece que las calles con ancho menores a 24 m el nivel de agua permitido son 0.3 m
Mendoza [18]	0.3	Aplicado para áreas urbanas

El segundo grupo considera el nivel de peligrosidad como una acción conjunta entre el nivel del agua y la velocidad. La Tabla 2.8 resume los criterios que definen las zonas de peligro de inundación teniendo en cuenta los valores máximos admisibles para el nivel del agua, la velocidad y la combinación de ambos parámetros. De esta tabla, la última fila Martínez-Gomariz et al. [19] hace referencia al umbral de criterio más estricto para los peatones expuestos a flujos de agua peligrosos.

Tabla 2.8 Criterios que consideran la acción conjunta entre el nivel del agua y la velocidad

Fuente	y_{max} (m)	v_{max} (m.s ⁻¹)	vy (m ² .s ⁻¹)
Human Stability in a High Flood Hazard Zone. AWRA Water Resources Bulletin. (USA) [20]	1.2	3.05	$0.71 \leq v.y \leq 2.13$
Clark County Regional Flood Control District (CCRFCD). Hydrological criteria and drainage design manual. Clark County (USA) [17]	0.3	-	$v.y \leq 0.55$
Control de desarrollo urbano en las zonas inundables (España) [21]	1	1	$vy \leq 0.5$
Curso de Hidrología Urbana Universitat Politècnica de Catalunya [10]	-	-	$v.y \leq 0.45$
Russo (Tesis doctoral). Universitat Politècnica de Catalunya [22]	0.16	1.88	$vy = 0.22$
Experimental study of the stability of pedestrians exposed to urban pluvial flooding [19]	-	-	$vy \geq 0.22$

Este criterio de nivel de peligrosidad se determinó a través de una configuración experimental. Se construyó un modelo físico de

una sección transversal de una calle urbana típica con un ancho de 1,6 m, una pendiente transversal fija del 2% y las pendientes longitudinales pueden variar de 0 a 10% de inclinación. Además, se introdujo un bordillo con una profundidad máxima de 15 cm según los códigos urbanos más comunes y una interfaz de calle peatonal para evaluar la estabilidad de los peatones desde el primer paso desde la acera hasta la calle inundada. La Fig. 2.8 representa el modelo físico implementado.



Figura 2. 8 Modelo Físico [19]

En este modelo, los flujos se generaron con la activación de una serie de bombas. La capacidad de cada una de las tres bombas varió de 105.49 l/s hasta 544.84 l/s cuando se activaron las tres bombas. Para medir la velocidad, se utilizó un dispositivo de Velocimetría Acústica Doppler (ADV). Se desarrollaron cinco perfiles de velocidad en todo el modelo de la sección de prueba. Esos cinco perfiles se aplicaron para dieciséis escenarios de flujos combinados de 4, 6, 8 y 10% de pendientes y 300, 375, 450 y 550 l/s de altas.

El experimento se realizó con 26 personas; 16 mujeres, 5 hombres y 5 niños. El rango de edades fue de 6 a 55 años, y los pesos de 37 a 71 kg y las alturas de 1,32 a 1,73 m. La prueba se llevó a cabo utilizando el protocolo establecido en Russo [22] y la clasificación del nivel de riesgo siguió estos criterios:

- Alto riesgo: el sujeto probado perdió estabilidad por completo.
- Riesgo medio: el sujeto evaluado mostró una gran dificultad para llevar a cabo el protocolo completo.
- Bajo riesgo: se observaron inestabilidades pequeñas o inestimables.

De acuerdo con los resultados para alto nivel de riesgo, se definió un umbral para la relación v_y ($v_y = 0.22 \text{ m}^2 / \text{s}$). Este valor es menor que otros criterios para evaluar la estabilidad de los peatones expuestos a los flujos de agua en las zonas urbanas. La figura 2.9 ilustra el umbral para la clasificación del nivel de riesgo y la zona estable para peatones obtenida en Martínez-Gomarizi et al. [19].

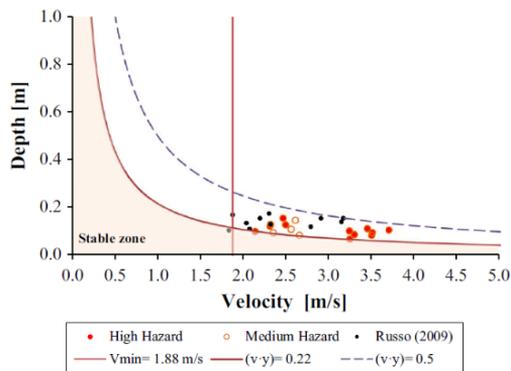


Figura 2. 9 Nivel de peligrosidad ($v_y = 0.22 \text{ m}^2/\text{s}$) y zona estable para peatones [19]

Las inundaciones repentinas en zonas urbanas no solo son peligrosas para los peatones sino también para los vehículos. A medida que el nivel y la velocidad del agua incrementan, la fuerza de arrastre de vehículos es mayor debido a la pérdida de estabilidad. Las variables involucradas que establecen la pérdida de la

estabilidad de los vehículos expuestos a corrientes peligrosas son similares a las establecidas para los peatones. Además de las variables hidráulicas del canal, como el nivel del agua y la velocidad, es necesario tener en cuenta las características físicas del vehículo, como el peso, la forma y el diseño [23].

Con el fin de proporcionar una herramienta para la toma de decisiones para los conductores expuestos a inundaciones urbanas, Martínez-Gomariz et. al [24] llevó a cabo una campaña experimental para obtener un método general para definir el área estable en el dominio de profundidad de flujo para cualquier vehículo. Esta campaña incluyó una gama de doce modelos de automóviles con diferentes escalas (1:14, 1:18 y 1:24). Este estudio estableció el par de valores de la relación profundidad-velocidad del agua v^* y (m^2 / s) para cada modelo.

La Tabla 2.9 muestra la clasificación del automóvil y la relación v^* y (m^2/s) utilizando los criterios de la Administración Nacional de Seguridad del Tráfico en las Carreteras de los Estados Unidos (NHTSA) que separa los vehículos en clases por el peso en vacío.

Tabla 2. 9 Clasificación de carros y relación nivel-velocidad

Carro	$(v^*y) (m^2/s)$
Mini, ligero y compacto	0.49-0.64
Medio	0.65-0.68
Pesado, Vehículo utilitario deportivo (VUD), Pickup, Vans	>0.69

Para el desarrollo de esta tesis doctoral se emplearon los criterios desarrollados por Martínez-Gomariz et al. [19] [24] para alertar a los peatones y conductores sobre la peligrosidad de los arroyos durante los eventos de lluvia. Para el caso de los peatones, este criterio fue seleccionado ya que es el más restrictivo y considera diferentes aspectos que influyen en la pérdida de estabilidad de los peatones como son la velocidad y nivel del agua, condiciones de calzado y el peso de las personas. Por lo tanto, si el producto de velocidad y nivel de agua estimado por el modelo propuesto excede el umbral de $0.22 \text{ m}^2/\text{s}$ en un punto de observación, se considera peligroso y la alerta se transmitirá.

En el caso de los conductores, este criterio fue considerado porque no solo tiene en cuenta las características físicas del vehículo sino que también considera la acción conjunta del nivel y velocidad del agua sobre la pérdida de estabilidad de los vehículos.

2.3 Estado del arte

Esta investigación llevó a cabo una revisión de la literatura con el fin de determinar la estructura básica de un sistema de alerta temprana para inundaciones repentinas en zonas urbanas en tiempo real. El objetivo del SAT es que la información enviada sea clara y llegue de forma oportuna a la comunidad en riesgo.

Esta sección está dividida en tres partes. La primera parte describe las características de las inundaciones urbanas, las variables que influyen en su formación y las medidas de mitigación y adaptación. La segunda presenta la estructura básica de un SAT eficaz y oportuno. En la tercera sección se revisaron diferentes arquitecturas

de SAT para inundaciones urbanas en tiempos reales implementados en diferentes locaciones a nivel mundial. Se describen los instrumentos principales y complementarios para medir las variables relacionadas con estas inundaciones, así como los métodos para el procesamiento de la información y los medios más utilizados para la diseminación de alertas.

Se realizó una búsqueda sistemática en referencias bibliográficas, bases de datos de citas y otros registros disponibles para el diseño de sistemas de alerta temprana en tiempo real para inundaciones repentinas en áreas urbanas. Se consultaron las bibliotecas digitales IEEE, ACM y Science Direct para seleccionar datos que van desde 2002 hasta 2017.

2.3.1 Inundaciones repentinas en zonas urbanas

La Organización Mundial de Meteorología (WMO, World Meteorological Organization) define la inundación repentina como *"una inundación de corta duración con una descarga pico relativamente alta"* [25]. La Sociedad Meteorológica de los Estados Unidos (AMS, American Meteorological Society) define lo siguiente: *"una inundación repentina es una inundación rápida formación, con poca o ninguna advertencia previa, generalmente como resultado de lluvias intensas en un área relativamente pequeña"* [2]. El Servicio Nacional de Meteorología de EE. UU. (NWS, National Weather Service) describe las inundaciones repentinas como: *"un flujo rápido y extremo de en un área*

normalmente seca, o un aumento rápido del nivel del agua en un arroyo o riachuelo por encima de un nivel de inundación predeterminado, comenzando dentro de las seis horas del evento causante (por ejemplo, lluvias intensas, falla de la presa) " [26]

Las inundaciones repentinas no son simplemente causadas por fenómenos meteorológicos y no sólo dependen de la cantidad y duración de la precipitación sino también de las características hidrológicas de la cuenca. Dentro de las características hidrológicas de la cuenca está la magnitud de la escorrentía, condición de humedad antecedente, área de drenaje, tipo de suelo, característica del uso de la tierra y topografía de la cuenca. [27] [28].

Estos fenómenos se han convertido en uno de los más mortíferos en todo el mundo teniendo en cuenta la proporción de víctimas mortales y los daños materiales a la propiedad cada año [29]. Aunque las inundaciones repentinas son fenómenos de gran importancia, son pocos los países que han implementado sistemas de alertas tempranas para este tipo de eventos [2]. Lo anterior obedece a la complejidad para predecir los eventos de inundaciones repentinas con suficiente precisión y antelación para que se puedan tomar medidas oportunas [30].

En zonas urbanas las inundaciones repentinas pueden ser producidas por fuertes lluvias locales que dan lugar a las inundaciones pluviales, desbordamiento de ríos o por mareas altas tormenta [31]. Las inundaciones pluviales se producen debido a un drenaje deficiente del agua durante estos eventos. Los efectos de

cambio climático como el aumento de la intensidad y duración de las lluvias acrecienta el problema de drenaje en zonas urbanas. Sin embargo, estas inundaciones pluviales a menudo se convierten en peligrosas inundaciones repentinas que sorprenden a las comunidades y son más difíciles de predecir [32].

Este problema se hace cada vez más común en las ciudades a medida que estas crecen y se expanden. Las inundaciones pluviales repentinas causan daños en pequeñas áreas de captación de menos de 100 km² (e incluso menos de 10 km²). La precipitación de estos eventos supera los valores de las tormentas de referencia utilizadas para el diseño de los sistemas de drenaje y estructuras hidráulicas de superficie en las ciudades [33] [35]

Acciones antrópicas como la pavimentación de los suelos y las alteraciones de los drenajes naturales dan lugar a la formación de escorrentías de alta energía debido a las fuertes lluvias. Este flujo de alta energía y el rápido escurrimiento del agua en las viviendas y los edificios generan inundaciones en las calles [36]. Otra de las causas de las inundaciones pluviales repentinas es el bloqueo de las instalaciones de drenaje con basura. Es importante contar con un sistema de limpieza y el mantenimiento de las instalaciones de drenaje, pero así mismo crear una cultura de limpieza y no arrojar basura a la calle por parte de la comunidad [31].

Medidas de mitigación y adaptación.

Actualmente la mitad de la población de la tierra vive en áreas urbanas en donde un desastre puede traer consecuencias dramáticas

si no se prevé adecuadamente y se toman las medidas correctas [33]. Las poblaciones más expuestas al riesgo de desastre son las ciudades con mayor densidad de población. Se prevé que las zonas urbanas experimentarán los efectos del riesgo climático con los aumentos del nivel del mar, inundaciones costeras, el aumento de la intensidad y frecuencia de eventos como las inundaciones repentinas [35]. La vulnerabilidad ante los desastres en áreas urbanas es la combinación de condiciones físicas, socioculturales, económicas e institucionales interrelacionadas [33]. El principal objetivo de la gestión del riesgo de inundación urbana es minimizar las pérdidas humanas y los daños económicos. Los riesgos de inundación no pueden ser totalmente evitados, por lo que tienen que ser manejados.

Existen medidas de adaptación, minimización y eliminación del riesgo de las pérdidas humanas y los daños económicos clasificadas en tipo estructural y no estructural [1] [3].

a) Medidas estructurales

Incluyen la construcción de estructuras físicas para reducir o evitar los posibles impactos de las amenazas tales como sistemas de protección, retención y sistema de drenajes, así como la utilización de técnicas de ingeniería para mejorar la resistencia y la resiliencia de las comunidades frente a las amenazas [37]. Estas medidas implican una inversión alta de recursos económicos y el tiempo de implementación es de mediano a largo plazo.

b) Medidas no estructurales

Son aquellas acciones que no implican la construcción de estructuras físicas sino que utiliza el conocimiento, leyes o políticas existentes para reducir el riesgo y sus impactos [3] [26]. Estas medidas se clasifican en pasivas y activas.

Las medidas no estructurales activas son aquellas que promueven la interacción directa con las personas, como son las capacitaciones, gestión a nivel local, sistemas de alertas tempranos orientados a las personas, información pública, entre otros. Las medidas no estructurales pasivas involucran las políticas, códigos y normas de construcción, reglamentos de uso de suelo y ordenamiento territorial.

Las EWS son herramientas de tipo no estructural de bajo costo y útiles para poblaciones que no poseen recursos suficientes para reducir al máximo el riesgo de las inundaciones. En el proceso de detección y difusión-comunicación se utilizan diferentes métodos e instrumentos para la detección, monitorización y análisis de las variables meteorológicas e hidráulicas relacionadas con las inundaciones repentinas.

2.3.2 Estructura de un sistemas de alertas tempranas para inundaciones repentinas en zonas urbanas

Los sistemas de alerta temprana son ampliamente utilizados en todo el mundo para la predicción de inundaciones. Son herramientas clave para reducir las pérdidas económicas y proteger la vida y la propiedad de una comunidad [38]. La información enviada por

EWS permite a las personas tomar medidas antes de que ocurra el desastre. Estudios recientes demuestran que estos sistemas tienen beneficios significativos que superan con creces sus costos [39].

Para que un sistema de alerta temprana sea efectivo, es necesario que la comunidad en riesgo participe activamente tomando acciones oportunas a partir de las advertencias recibidas [40]. En las áreas urbanas, las inundaciones repentinas ocurren al inicio o durante un evento de lluvia, especialmente cuando la lluvia de alta intensidad cae sobre suelos poco profundos e impermeables, el drenaje es ineficiente y la vegetación es escasa [3].

Según la Organización Meteorológica Mundial (World Meteorological Organization, OMM) y la Estrategia Internacional para la Reducción de los Desastres (International Strategy for Disaster Reduction, ISDR), la arquitectura de los SAT se divide en los siguientes elementos o estructuras clave: Conocimiento del riesgo de desastres, Pronóstico, Difusión-Comunicación y Preparación-Respuesta [25] [41].

- *Conocimiento del riesgo de desastres*

Este elemento se identifica las amenazas, vulnerabilidades y riesgos en la población. La información debe ser obtenida de fuentes oficiales y debe ser relevante y concisa. Con esta información se procede a elaborar un mapa de riesgos para determinar las prioridades de un SAT y orientar los preparativos para la prevención y respuesta ante desastres [42].

- *Pronóstico*

Este elemento se encarga de la detección, monitoreo y análisis de

variables meteorológicas e hidráulicas relacionadas con inundaciones repentinas. Se puede llevar a cabo utilizando diversos instrumentos y métodos, pero existen dispositivos indispensables para este trabajo [43]. Para el análisis de la información se emplean de herramientas de análisis, modelos de computadora con el fin de diseñar las alertas [44].

- *Difusión-Comunicación*

El término difusión se refiere al envío de la advertencia, mientras que la comunicación se logra solo cuando la información se recibe y se comprende [45]. El envío de la información debe ser oportuna, recopilada y entendida por toda la comunidad en peligro. Asimismo, las advertencias deben ser simples, claras y útiles para que se tomen las decisiones oportunas. Esto permite respuestas adecuadas que ayudan a salvaguardar vidas y medios de vida [40].

- *Preparación-Respuesta*

La preparación y respuesta involucra todas las actividades de la comunidad frente a las inundaciones repentinas y su respuesta. La participación activa de las comunidades y autoridades locales en el diseño de EWS puede mejorar la efectividad de todo el proceso de advertencia y, por lo tanto, conducir a una mayor y mejor respuesta a una alerta.

Es necesario que la comunidad reciba e interprete correctamente las alertas emitidas, para que puedan sacar las conclusiones necesarias para las acciones que se deben tomar, como alertar a la policía local o los bomberos [46].

La Estrategia Internacional para la Reducción de los Desastres

(ISDR) desarrolló una lista de verificación basada en los cuatro elementos clave como una herramienta práctica para diseñar sistemas de alerta temprana de manera efectiva, teniendo en cuenta el objetivo de cada elemento, principales actores y acciones a desarrollar [40]. La Tabla 2.10 muestra los objetivos principales de cada elemento clave desarrollado por el ISDR.

Tabla 2. 10 Elementos clave y actores clave de un sistema de alerta temprana

Elemento clave	Objetivo
Conocimiento del riesgo de desastres	Establecer un proceso sistemático y estandarizado para recopilar, evaluar y compartir datos, mapas y tendencias sobre peligros y vulnerabilidades
Pronóstico	Establecer un servicio eficaz de monitoreo y advertencia de peligros con una sólida base tecnológica
Difusión-Comunicación	Desarrollar sistemas de comunicación y difusión para garantizar que las personas y las comunidades reciban advertencias de forma oportuna y faciliten la coordinación nacional e regional y el intercambio de información.

2.3.3 **Sistemas de alertas tempranas para inundaciones repentinas en tiempo real**

Esta sección presenta diferentes arquitecturas de sistemas de alerta temprana implementados en todo el mundo para alertar a la comunidad sobre el riesgo de inundaciones repentinas. Cada arquitectura describe los instrumentos utilizados para monitorear

diferentes variables hidrometeorológicas, los protocolos de comunicación para el envío de los datos medidos y los canales para el envío de las alertas a la comunidad en riesgo.

Nakhon Si Thammarat, Tailandia

En Nakhon Si Thammarat, una provincia del sur de Tailandia, se desarrolló un sistema inalámbrico de monitoreo de inundaciones para la mitigación y manejo de desastres por inundaciones en áreas urbanas y suburbanas [1]. Este sistema de monitoreo inalámbrico provee información sobre inundaciones a las agencias federales, estatales y locales, así como a las comunidades locales. De igual forma, se encarga de monitorear información crucial relacionada con las inundaciones (nivel de agua, caudal y precipitación). Los mensajes son enviados a través de mensajes de texto (SMS), FAX, correo electrónico y una aplicación WEB y móvil. El sistema consiste en dos módulos principales, Remote Site y Control center como se muestra en la figura 2.10.

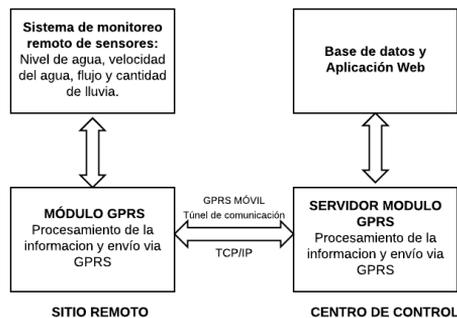


Figura 2. 10 Arquitectura General [1]

El módulo REMOTE SITE está compuesto por una sección de monitoreo, adquisición y el sistema para el envío de la información al centro de control. La sección de monitoreo contiene 15 dispositivos remotos ubicados alrededor de la zona de riesgo de inundación en Nakhon Si Thammarat y un sistema de comunicación bajo el estándar GPRS. Estos dispositivos remotos incluyen sensores que miden el nivel del agua, el flujo y la precipitación en cada punto. El nivel y velocidad del agua es monitoreado por un sensor Doppler ultrasónico y la cantidad de lluvia es medida a través de pluviómetros de doble cubeta basculante. La información obtenida es almacenada en un data logger. Dado que el registrador de datos es muy sensible a las fluctuaciones de la velocidad del agua en el canal, se utilizó la velocidad media en un intervalo de tiempo en lugar de datos sin procesar. El registrador de datos está conectado a un Modem GPRS vía interfaz serie RS232 con comandos AT. A través del módulo GPRS se envía la información obtenida del registrador de datos en cada punto de medida al centro de control (CONTROL CENTER).

El módulo CONTROL CENTER consta de un servidor que contiene la base de datos históricos, procesa en tiempo real la información medida por los sensores y visualiza la información a través de una aplicación WEB. Los datos históricos recopilados son visualizados en forma de gráficos y tablas. Los usuarios finales pueden acceder a este sistema a través del navegador WEB (Internet) o dispositivos móviles (WAP: Wireless Application

Protocol) y ver la variación del nivel y velocidad del agua en tiempo real.

Esta API, extrae los últimos registros del sensor cada 10 minutos y la envía al centro de datos. Para el proceso de predicción nivel del agua, el flujo y el nivel de precipitación en las próximas 24 horas se aplica un modelo de red neuronal.

Los sensores y sus conexiones, el data logger y el sistema de comunicaciones se encuentran dentro de una caja que cuenta con dos ventiladores para la correcta circulación del aire. El sistema de comunicaciones puede detectar si los ventiladores están funcionando y notifica al centro de datos vía SMS si éstos dejan de funcionar. Además, informará si hay alguna intrusión al abrir la puerta del armario. Para evitar una interrupción de energía inesperada que podría dañar el equipo, se instaló un sistema de alimentación ininterrumpida (UPS) y un protector contra sobretensiones. Esto permite que todo el equipo funcione por lo menos veinticuatro horas con un suministro continuo de energía eléctrica cuando no esté disponible.

Génova, Italia

En Génova, Italia, se diseñó una red inteligente de sensores para control de inundaciones repentinas, diagnóstico y gestión en áreas urbanas [47]. El territorio urbano de Génova posee un gran número de ríos y arroyos con cuencas empinadas y edificios que no cumplen con las medidas de seguridad. Esto produce que el tiempo

de retraso, tiempo pico de precipitación y el pico de descarga correspondiente sean extremadamente corto, por lo tanto, el tiempo de intervención y respuesta ante una inundación repentina también es crítico. Para solucionar este problema diseñaron un sistema basado en una red de sensores y técnicas de reconstrucción de mapas en 3D para el cálculo del caudal de los arroyos de todas las áreas potencialmente inundables. Estos cálculos son de alta precisión y sin la intervención humana. La figura 2.11 muestra la arquitectura general del sistema que consta de siete secciones.

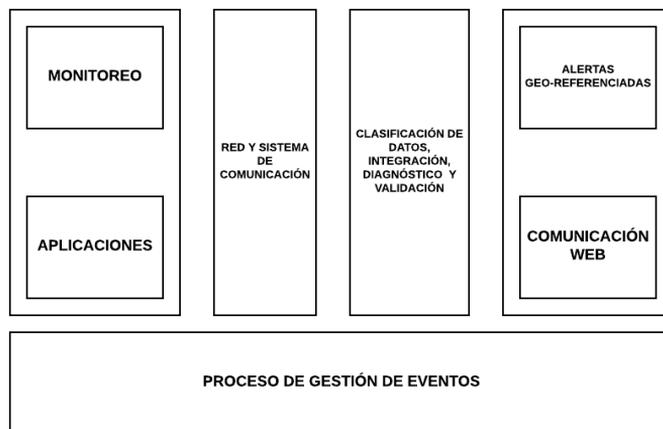


Figura 2. 11 Arquitectura general del sistema en Génova

- *Monitorización.* Esta sección está compuesta por sensores para el monitoreo de lluvia, sensores para el monitoreo de descarga de agua y sensores utilizados para la reconstrucción de mapas 3D. Estos últimos son una combinación de diferentes tipos de sensores de bajo coste (IMUs, Laser scanners, stereo cameras) utilizados ampliamente en la reconstrucción de mapas en 3D con robots [48]. Los sensores instalados en su mayoría no tienen contacto directo

con el agua. Este tipo de sensores aunque pueden ser más costosos son libres de mantenimiento y más fiables. Al no estar en contacto directo con el arroyo están exentos de sufrir averías por parte del impacto de la corriente de agua y sedimentos.

- *Aplicaciones.* Está compuesto por aplicaciones y herramientas que organizan, recolectan y visualizan la información en un solo punto utilizando datos de geo-referenciación provisto por los ciudadanos.

- *Red y sistema de comunicación.* Cada punto remoto contará con diferentes equipos de comunicaciones que permitan detectar y conectarse a redes WiFi, móviles y de satélite disponibles. Este sistema ayudará a crear una red tolerante a fallos. Para la conexión física de estos sensores se realizará una integración en un único nodo sensor. Se plantea la posibilidad de utilizar un dron que transmita vídeos de alta calidad.

- *Clasificación de la información, integración, diagnóstico y validación.* El proceso de clasificación e integración se encarga del diseño de una aplicación abierta y modular que integre nuevos sensores tan pronto como estén disponibles. Se busca obtener un alto grado de interoperabilidad entre los diferentes dispositivos utilizando metodologías web semántica.

El diagnóstico y validación procesa de forma rápida y precisa la información obtenida por los sensores. Los niveles de alarma y las notificaciones de advertencia son obtenidos a través de criterios y métodos de razonamiento automatizados desarrollados en el campo de la inteligencia artificial.

- *Alertas geo-referenciadas.* La información geo-referenciada

se utiliza para evitar alarmas innecesarias en áreas no críticas y obtener una adaptación más flexible de las notificaciones de advertencia. Los ciudadanos que viven o trabajan alrededor de la zona afectada pueden enviar mensajes de texto SMS o correo electrónico con información del estado del arroyo.

- *Comunicación vía WEB.* Las aplicaciones móviles geográficas tales como Google Maps y Open Street Map son útiles para difusión de información a los ciudadanos. A través de ellas se pueden visualizar mapas de riesgos hidrológicos, datos históricos geo-referenciados y análisis estadísticos. Es importante contar métodos de visualización de los datos recopilados y que estén disponibles para usuarios finales especialistas como no especialistas.

- *Procesos de gestión de eventos.* En este módulo se propone el diseño de plataformas para la reconfiguración dinámica del tráfico vial, cadenas de suministro de alimentos, transporte público, rutas de vehículos de emergencia, evacuación de personas, entre otros durante las inundaciones repentinas.

Florida, Estados Unidos

En zonas urbanas es deseable que durante los eventos de lluvia exista información en tiempo real para conductores y pasajeros de los estados de las vías y carreteras susceptibles a inundaciones repentinas. Ni-Bin Chang and Da-Hai Guo [49] proponen una red de sensores que permite la monitorización del nivel del agua y envío de video del estado del canal. Este proyecto fue diseñado para

implementarse en ciudades del estado de la Florida, Estados Unidos, las cuales experimentan impactos de tormenta convectiva. Este sistema está compuesto por tres módulos: Módulo de monitoreo de nivel de agua ultrasónico, Modulo de video y Módulo de procesamiento de la información. La figura 2.12 muestra el diagrama general del sistema

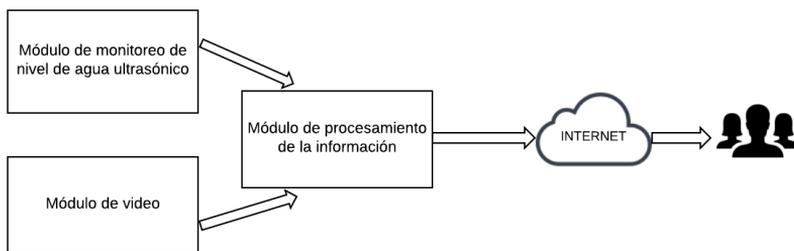


Figura 2. 12 Diagrama general del sistema [49]

- *Módulo de monitoreo de nivel de agua ultrasónico.* Este módulo recibe información sobre el nivel del agua a través de sensores ultrasónicos. El tipo de sensor ultrasónico empleado es el WL700 y fabricado por la empresa Global Water Instrumentation. Dado que el sensor WL700 estará expuesto al aire libre se propone utilizar un sistema fotovoltaico para alimentar el sensor con un panel solar y una batería conectada al sensor. El sensor WL700 está conectado a una tarjeta de adquisición de datos y esta a su vez está conectada a un sistema inalámbrico. La información obtenida por el sensor de nivel es enviada al módulo de procesamiento de datos a través del sistema inalámbrico. Si se desea instalar diferentes sensores de nivel los datos de los sensores llegan a un nodo común.

El nodo de común está conectado al concentrador que envía datos a un servidor a través de diferentes protocolos.

- *Módulo de video.* Está compuesto por un grupo de cámaras que serán instaladas en las intersecciones principales. Las cámaras proporcionaran información de monitoreo de tráfico de video e imágenes de video. Cada cámara tendrá asignada una dirección IP la cual los usuarios pueden acceder desde un navegador web.
- *Módulo de procesamiento de la información.* Este módulo combina todas las fuentes de información. Brinda a los usuarios finales tres tipos de información: datos sin procesar, datos predichos e información de vídeo. Los datos sin procesar es la información obtenida por los sensores y los datos predichos son obtenidos a través de modelos matemáticos. Todos estos datos deben ser accesibles en línea.

Manila, Filipinas

En dos calles cercanas al metro de Manila, Filipinas, instalaron un sistema de monitoreo de inundaciones urbanas [50]. En esta investigación se desarrolló un modelo de predicción de inundación que permite la identificación de calles inundadas y sugiere rutas alternativas a los conductores. El método utilizado para realizar la predicción es *Random Forest* debido a su facilidad de implementación y los requisitos computacionales subyacentes. El sistema está dividido en tres secciones principales: Instrumentación electrónica, Procesamiento de la información (servidor) y Servicios Web

- *Instrumentación electrónica.* Consiste en un sensor de presión a tierra y un pluviómetro conectado al registrador de datos alimentado por energía solar. Estos dispositivos son colocados dentro de una caja metálica para evitar su manipulación por parte de personal no autorizado. La información obtenida es enviada a través de un módulo GPRS a un servidor. Dos nodos se instalaron en dos calles cercanas (Earnshaw y San Diego Calles) en el Boulevard España, Manila.
- *Procesamiento de la información (Servidor).* Está compuesto por un servidor TCP para procesar los datos entrantes de las estaciones de hardware e insertar en bases de datos PostgreSQL y MongoDB. Esta sección recibe los datos y luego los procesa para proveer información en tiempo real de las inundaciones a través de servicios móviles y web.
- *Servicios Web.* Se desarrolló una aplicación WEB para proveer información en tiempo real, información de datos históricos y datos de inundación a los usuarios. Así mismo, una aplicación móvil muestra la variación en tiempo real de las inundaciones repentinas en las calles para que los usuarios puedan ajustar sus rutas y horarios de viaje. Diversas instituciones e investigadores interesados en el tema de las inundaciones en Metro Manila comparten información a través de un servicio de interfaz de programación de aplicaciones web (API).

Para realizar la predicción para cada estación es necesario realizar cuatro procesos previos: Extracción de los datos, Preparación, Predicción, y validación.

- Extracción de los datos: Los datos recopilados son enviados a un servidor y son almacenados en una base datos
- Preparación de los datos: Se seleccionan las variables y etiquetas necesarias para el modelo de predicción.
- Predicción: Se aplica el modelo *Random Forest* a través de un código en lenguaje Python.
- Validación: El modelo resultante de *Random Forest* se prueba usando datos históricos de lluvia.

Phitsanulok, Tailandia

Las zonas urbanas aledañas a ríos son propensas a inundaciones durante eventos de lluvia de alta intensidad. En la provincia de Phitsanulok de Tailandia, hay muchas áreas propensas a inundaciones en especial el distrito Nakhon Thai. Un sistema de alerta temprana se desarrolló para alertar de forma oportuna a la comunidad que se encuentra aguas arriba y aguas abajo del río [51]. Durante un evento de lluvia, el flujo demora 2 horas desde aguas arriba hasta agua abajo. Una vez inicia el evento de lluvia el sistema puede avisar inmediatamente al poblado que se encuentra aguas arriba y luego avisar al área aguas abajo aproximadamente con 2 horas de antelación. La alarma se emite cuando el nivel de escorrentía y el nivel de agua subterránea también exceden un punto crítico establecido. Así mismo, si ocurre un deslizamiento de tierra

el sistema alertará a la comunidad. El sistema está compuesto por dos estructuras, la estructura de aguas arriba y la estructura aguas abajo.

- *Estructura Aguas arriba.* Cuenta con dos sensores de nivel, un sensor que mide la profundidad de la escorrentía y el otro sensor el agua subterránea. El sistema también tiene un pluviómetro, un registrador de datos, una unidad de procesamiento, una sirena de advertencia y un transmisor de SMS (Short Message Service).
- *Estructura Aguas abajo.* Cuenta también con una sirena y sistema de recepción de mensajes. Cuando los niveles de agua alcanzan un punto crítico en aguas arriba la sirena se activa y se envía la información al receptor aguas abajo el cuál activará la sirena. Los dispositivos son alimentados por paneles solares junto con baterías tanto para aguas arriba como para aguas abajo.

Este sistema cuenta con tres niveles de alerta: bajo, medio y alto. Cuando el nivel de alerta es bajo, la sirena se activa por 10 segundos y luego permanece apagada 50 segundos. Luego se enciende nuevamente y este proceso lo realiza aproximadamente 10 veces. Cuando la alerta es media, la sirena se activa por 20 segundos y unos 40 segundos por 20 veces. Cuando la alerta es de nivel alto, la alarma se activa por 30 segundos y permanece apagada por 30 segundos por 30 veces.

Barranquilla, Colombia

La ciudad de Barranquilla, Colombia no cuenta con un sistema de drenaje pluvial eficiente, por lo tanto, durante los eventos de lluvia las calles se convierten en peligrosas corrientes de agua llamadas “arroyos” [52]. Como medida de adaptación a los arroyos peligrosos de la ciudad, investigadores de la Universidad de la Costa desarrollaron un Sistema de Alerta Temprana para emitir alertas a la comunidad sobre el peligro de los arroyos durante eventos de lluvia [34]. Se seleccionó uno de los arroyos más peligrosos de la ciudad, arroyo “La Brigada” el cual tiene una longitud de 4550 m. El sistema desarrollado está compuesto por una red de sensores inalámbricos, sistema de comunicaciones, servidor y una aplicación web para el envío de la información. La figura 2.13 ilustra la arquitectura del sistema desarrollado en Barranquilla.

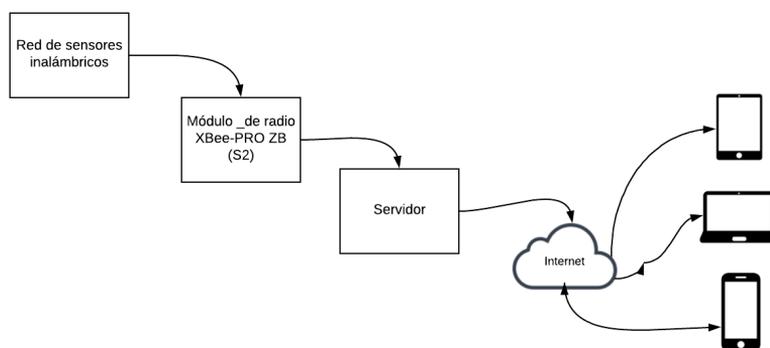


Figura 2. 13 Arquitectura general del Sistema de Alerta Temprana [34]

- *Red de sensores inalámbricos.* Esta red está compuesto por seis nodos desplegados a lo largo del recorrido del arroyo que se encargarán de vigilar las condiciones ambientales presentes en su

recorrido. De estos nodos, cinco operan como dispositivos finales que se comunicarán por medio de saltos (Red Ad-Hoc) con el Gateway en el nodo 6. El nodo 6 es el que se encarga de controlar la red y regular los eventos y mensajes.

- *Módulo de radio.* La información obtenida por los nodos es enviada a un servidor por medio de la tecnología Zigbee utilizando el módulo de radio XBee-PRO ZB (S2) [53]. Este módulo utiliza los protocolos IEEE 802.15.4 y ZigBee para comunicarse con otros nodos sensores y con la estación base.
- *Servidor.* El servidor recibe los datos obtenidos por la red de sensores inalámbricos y a través de una aplicación web y móvil presenta a los usuarios finales la información. La aplicación web-móvil se desarrolló bajo la técnica de modelado de objetos (Object Modeling Technique, OMT), la cual es de carácter abierto y de dominio público [54]. Esta metodología propone tres fases consecutivas y evolutivas para su el desarrollo de la aplicación: Análisis de objetos, Diseño e implementación.

De acuerdo a la revisión anterior un sistema de alerta temprana efectiva para cualquier tipo de inundación debe comprender cuatro elementos claves: Conocimiento del riesgo de desastres, Pronósticos, Difusión-Comunicación y Preparación-Respuesta.

- El conocimiento del riesgo: Involucra la identificar los peligros, la exposición, las vulnerabilidades y los riesgos de una población.
- Pronósticos: Busca establecer niveles de alerta con base a las mediciones de las variables que influyen en la formación de las

inundaciones y el procesamiento de esta información.

- **Difusión-Comunicación:** La difusión implicar el envío de la advertencia y la comunicación se logra solo cuando la información es recibida y comprendida por la comunidad en riesgo. Para lograr lo anterior es necesario que el envío de la advertencia sea oportuno y el contenido de la alerta sea claro, conciso y comprensible por toda la comunidad.

Las arquitecturas revisadas en esta sección presentan diferentes diseños de sistemas de alertas tempranas en tiempo real para inundaciones repentinas y comparten una arquitectura similar a la figura 2.14

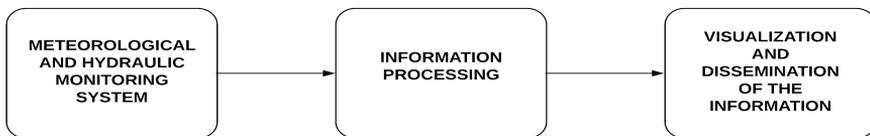


Figura 2. 14 Estructura general de los sistemas de alerta temprana revisados

Los instrumentos más utilizados para medir las variables que influyen en la formación de inundaciones repentinas son sensores de nivel y pluviómetros. Todos los proyectos revisados utilizan protocolos de comunicación inalámbrica para el envío de los datos medidos a centros de procesamiento de la información, el cuál a través de diferentes tipos software crean las alertas para la comunidad en riesgo. Sin embargo, ninguno de los proyectos revisados cuenta con un sistema de prevención de fallos de envío de los datos. Esto quiere decir que, en caso de pérdida de la conexión del sistema, los datos no pueden ser enviados de forma inmediata.

Finalmente, las alertas son enviadas a la comunidad por distintos canales aplicaciones Web y móvil, mensajes de texto y en otros casos a través de sistemas sonoros.

El anexo F presenta revisión detallada de los elementos claves que conforman un SAT efectivo durante las inundaciones repentinas. Realiza las comparaciones de los instrumentos de medición protocolos de comunicación y medios más empleados para el envío de las alertas en diferentes proyectos implementados a nivel mundial. Finalmente, propone un modelo de SAT efectivo, centrado en las personas y con sistemas de prevención de fallos para que garantizar que las alertas lleguen de forma oportuna a la comunidad en riesgo.

Capítulo 3: Metodología

Este capítulo describe la metodología desarrollada en esta tesis para el diseño e implementación de un sistema de alerta temprana que alerte en tiempo real sobre el estado de peligrosidad de inundaciones pluviales repentinas durante los eventos de lluvia. Esta tesis se presenta como una medida no-estructural de adaptación y mitigación del número de víctimas mortales y pérdidas económicas, en ciudades con sistemas de drenaje de aguas pluviales deficientes o inexistentes.

El sistema desarrollado se implementó en la ciudad de Barranquilla (Colombia), ubicada en la costa norte del país. Actualmente, no todas las zonas de la ciudad cuentan con un sistema de drenaje de aguas pluviales, por lo tanto, durante eventos de alta precipitación las calles se transforman en peligrosos arroyos que arrastran personas y vehículos, produciendo en algunos eventos, víctimas mortales y pérdidas económicas.,

Este capítulo está dividido en cuatro secciones. La primera sección describe el caso de estudio y presenta las características de los arroyos en la ciudad de Barranquilla. La segunda sección determina la metodología para realizar el *site survey* y el levantamiento de topografía para la selección de los puntos geográficos para la instalación del sistema de monitorización. La tercera sección presenta el diseño de la red, la selección de los dispositivos de monitorización, el sistema de comunicaciones empleado para el

envío de la información, el sistema de alimentación de la red y el sistema de visualización de la información. La cuarta sección muestra el diseño del modelo hidrológico e hidráulico para la detección del nivel de peligrosidad.

3.1 Descripción del caso de estudio

La ciudad de Barranquilla se encuentra ubicada en la costa norte de Colombia en las siguientes: $10^{\circ}57'42''$ N latitud y $74^{\circ}46'54''$ W longitud. Durante eventos de lluvia dentro de la ciudad se producen las inundaciones repentinas cubriendo toda la ciudad. Gran parte del agua que cae desliza, convirtiendo las calles en arroyos peligrosos. Esto ocurre debido una serie de factores como, el crecimiento urbano no planificado, condiciones pluviométricas, topográficas, geomorfológicas, carencia de un sistema de drenaje de aguas pluviales, relleno u ocupación de zonas aledañas a los arroyos, reducción del área de evacuación, impermeabilización de la ciudad con cemento rígido, disminución de zonas verdes, entre otros [55]. Esto último ha generado un aumento involuntario del caudal de esorrentía, fuerza de arrastre y velocidad del flujo, causando la muerte a muchas personas y pérdidas materiales. Las figuras 3.1 y 3.2 evidencian el riesgo al que se exponen los vehículos y peatones durante las fuertes lluvias en la ciudad de Barranquilla en dos arroyos distintos.



Figura 3. 1 Arroyo peligroso 1 en Barranquilla
[Fuente anónima]



Figura 3. 2 Arroyo peligroso 2 en Barranquilla
[Fuente anónima]

En la figura 3.3 los vehículos fueron sorprendidos por el arroyo peligroso de la carrera 43 siendo arrastrados por la fuerza de la corriente.



Figura 3. 3 Vehículos arrastrados por arroyo peligroso carrera 43 en Barranquilla

[Fuente anónima]

Diferentes propuestas fueron planteadas para la solución del problema de los arroyos en la ciudad de Barranquilla. Inicialmente se realizaron campañas de socialización frente a la convivencia y adaptación a los arroyos instruyendo a la comunidad en no arrojar basura a los diferentes canales y no intentar cruzar los arroyos bajo ninguna circunstancia. De igual forma, se instalaron señales que indican las calles que se transforman en arroyos peligrosos mientras se encontraba una solución definitiva. A pesar de estas medidas las personas persisten en cruzar los arroyos desconociendo el peligro de estas fuertes corrientes. Otras medidas estructurales fueron llevadas

a cabo como la ampliación de las calles, cambios en el pavimento y relocalización de redes de servicio público, pero no se logró la eliminación o reducción del número de arroyos peligrosos [56].

A partir del año 2015 la administración local emprendió nuevos proyectos estructurales para la canalización de siete arroyos, logrando con éxito canalizar dos de ellos hasta la fecha. Sin embargo, durante las fuertes lluvias, las basuras arrojadas por los ciudadanos a las calles, provocan la obstaculización del sistema de drenaje ocasionando que sigan formándose los arroyos.

Esta tesis tomó como objeto de estudio el arroyo “La 65” o comúnmente llamado “La brigada”. Este arroyo tiene una longitud aproximada de 4.55 km y el área de la cuenca es de 3.7 km². La figura 3.4 muestra la cuenca y el recorrido del arroyo.



Figura 3. 4 Cuenca y recorrido del arroyo La 65 (Acosta-Coll et.al, 2018)

3.2 Levantamiento de topografía y *site survey*

Se realizó un levantamiento topográfico en la ruta desde el inicio del arroyo La 65 hasta su desembocadura en el río Magdalena, que inunda las propiedades de la Escuela Naval de Suboficiales de la ciudad. Este levantamiento topográfico proporciona información de corte transversal para secciones medidas cada 50 metros lineales. Se midieron los valores altimétricos de eje de vía, borde de vías, bordillos, paramentos, andenes y líneas de propiedad. Estas secciones se tomaran a lo largo del trazado al inicio, mitad y final de cada calle, asimismo, detalle altimétrico de cada intersección del trazado. La figura 3.5 muestra el perfil longitudinal de la corriente, que tiene una pendiente promedio de 1.8% con respecto a los niveles más alto y más bajo.

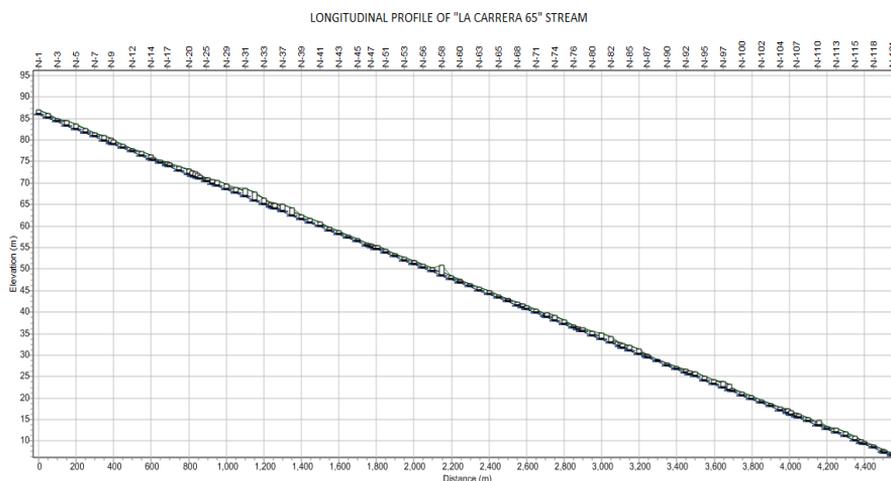


Figura 3. 5 Perfil longitudinal del arroyo La 65 [57]

El trabajo de levantamiento topográfico fue realizado por un grupo especializado conformado por:

- a) Un técnico topógrafo
- b) Dos auxiliares de topografía
- c) Un técnico dibujante.

Los instrumentos y software empleados para el desarrollo del levantamiento y diseño de los planos son:

- a) Estación Topcon GTS-235
- b) Software Topcon Link para cálculo y procesamiento de información topográfica
- c) Software AutoCad Civil3D 2014 para dibujo y elaboración de planos y perfiles.

El anexo 1 muestra los planos del levantamiento de topografía para el recorrido del arroyo la 65

El *site Survey* es un estudio detallado sobre el sitio donde se realizará la implementación de un proyecto. A través de este estudio se pueden definir las necesidades que tiene el cliente y determinar cuáles son las condiciones técnicas y sociales necesarias para la implementación.

Los requisitos técnicos y sociales que se tuvieron en cuenta para la selección de lugares para instalar los instrumentos de monitorización a lo largo del arroyo son los siguientes:

- La transmisión de los datos tiene que ser en tiempo real

- Las mediciones se administrarán de forma remota y los sensores no podrán estar en contacto con la corriente. Es obligatorio evitar el impacto con vehículos y escombros arrojados a la corriente que pueden dañar los sensores e introducir errores de medición.
- La fuente de alimentación estará fuera de la red y la energía será proporcionada por un sistema fotovoltaico por lo tanto, se implementarán sensores de bajo consumo de energía.
- El equipo total debe ser resistente a la intemperie y con altos niveles de resistencia a la salinidad y humedad, debido a las condiciones ambientales del clima tropical donde se desarrolla el proyecto.
- Cobertura de red inalámbrica
- Accesibilidad
- Seguridad contra robos y daños

Para la caracterización y selección del sitio se utilizó un formato técnico teniendo en cuenta los requerimientos anteriores. Con la información obtenida se seleccionaron los siguientes puntos dentro del recorrido del arroyo:

1. Calle 65 # 38 – 69
2. Calle 62 # 46 – 102
3. Calle 59 # 53 esquina

Teniendo en cuenta la información presentada en el capítulo anterior, la peligrosidad de las inundaciones repentinas en zonas urbanas está asociada a la acción conjunta del nivel y velocidad del agua, asimismo, influyen las características físicas e hidráulicas del

canal. Para evitar el impacto de los vehículos, la turbulencia del arroyo y diferentes materiales que se arrastran durante los eventos de lluvia en las calles, los sensores empleados fueron instalados en postes de energía eléctrica propiedad de la empresa ELECTRICARIBE SA utilizando una grúa con canasta. La figura 3.6 y 3.7 muestra las especificaciones de conexión del sistema de adquisición de datos y alimentación al poste de energía.

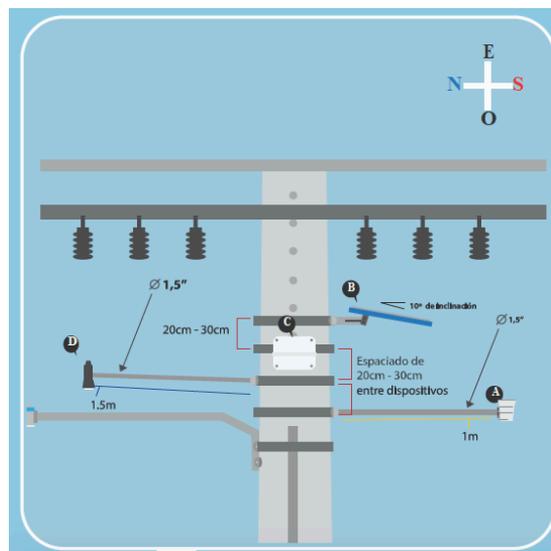


Figura 3. 6 Especificaciones de instalación de conexión

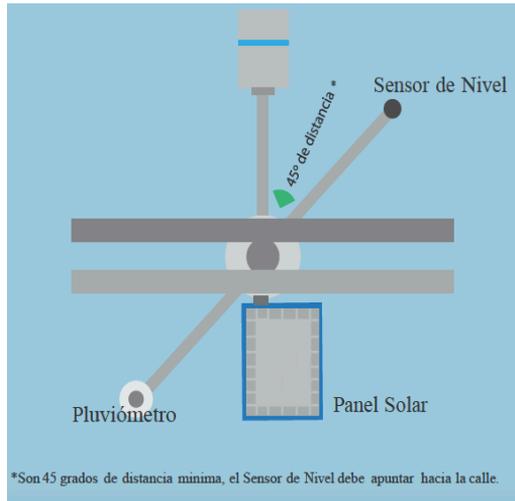


Figura 3. 7 Vista superior de especificaciones de conexión en poste en poste de energía

Las figuras 3.8 a 3.11 muestran el proceso de instalación y los puntos donde fueron instalados los sistemas de monitorización.



Figura 3. 8 Proceso de instalación



Figura 3. 9 Punto 1



Figura 3. 10 Punto 2



Figura 3. 11 Punto 3

3.3 Diseño de la red

Para diseñar la estructura de la red se utilizó la metodología Top – Down, donde se describen los requerimientos que debe cumplir la red en cuanto a su funcionamiento y finalidad del mismo. Para la selección de los sensores de medición, protocolos de comunicación y los medios para el envío de la información a la población se realizó una revisión de diferentes arquitecturas implementadas a nivel mundial para alertar sobre el peligro de inundaciones pluviales repentinas (Anexo C).

Teniendo en cuenta las variables hidráulicas involucradas en el proceso de formación de inundaciones repentinas en zonas urbanas y los requerimientos técnicos y sociales para desarrollar el proyecto se obtuvieron las siguientes consideraciones:

- Se requiere de un levantamiento topográfico detallado de la cuenca de estudio definiendo las características físicas de las secciones transversales
- Se emplearán tres sensores / transductores para medir la cantidad de agua que llueve, el nivel del agua y velocidad del agua.
- La información obtenida de los tres sensores se utilizará como entradas de información del sistema para su posterior envío y visualización.
- Esta información debe ser procesado y transmitida por medio de un módulo de comunicación y un protocolo adecuado para la solución a implementar en tiempo real
- El sistema de alimentación debe proporcionar la energía necesaria a los elementos activos del sistema.

Con base en esta información inicial, se definió el siguiente modelo del sistema a través de un diagrama de bloques que describe el funcionamiento general como lo muestra la figura 3.12.

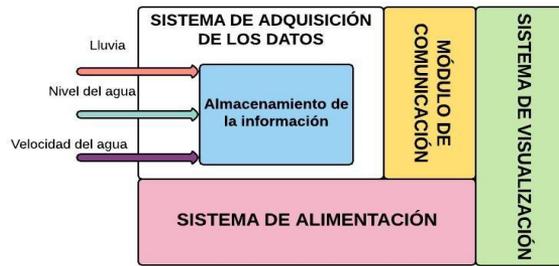


Figura 3. 12 Diagrama de bloques arquitectura de la red

- **Entradas y salidas del sistema:** Se tienen tres entradas que son las tres variables a medir. Los dispositivos seleccionados tienen características estables en cuanto a la alimentación, consumo y exactitud de la medida.
- **Terminal de adquisición de datos:** Los sensores están conectados a un concentrador o Gateway y por medio de un módulo de comunicaciones se envía la información.
- **Módulo de comunicaciones:** Se utilizó un módulo de comunicaciones con tecnología GPRS para el envío de los datos adquiridos hasta un servidor web.
- **Sistema de alimentación:** Se diseñó un sistema fotovoltaico para alimentar el sensor de nivel, el Gateway y el módulo de comunicaciones.
- **Sistema de visualización:** Se desarrolló una aplicación Web que permite visualizar el recorrido del arroyo, la ubicación de los puntos de medida, los valores medidos en tiempo real y el nivel de peligrosidad. Asimismo, la información es enviada a las redes sociales

Cada punto de medida se le ha llamado NODO y contiene la estructura de red descrita, por lo tanto, las mediciones de cada nodo son independientes. La figura 3.13 muestra la arquitectura general del sistema y la figura 3.14 la descripción TOP-DOWN los nodos de la red.

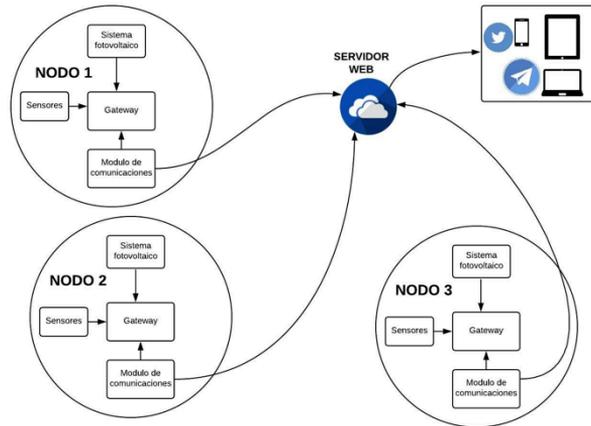


Figura 3. 13 Arquitectura general

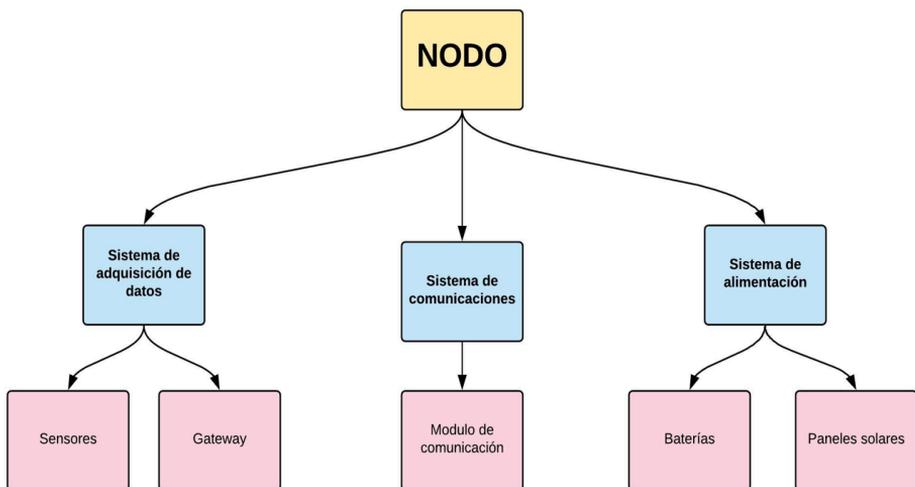


Figura 3. 14 Descripción TOP-DOWN de la estructura de los nodos

3.3.1 Sistema de adquisición de datos

El sistema de adquisición de datos en cada nodo está compuesto por el sensor de nivel para medir la lámina de agua, un pluviómetro para medir la cantidad de lluvia y el Gateway que recibe los datos de los sensores y los envía a través del módulo de comunicaciones. Para medir la velocidad del agua se utilizó un sensor de velocidad superficial del agua tipo radar, pero éste está por fuera del nodo ya que tiene su propio sistema de alimentación. Los datos medidos por este sensor se tomaron *in situ*. La figura 3.15 muestra la estructura TOP-DOW del sistema de adquisición de datos

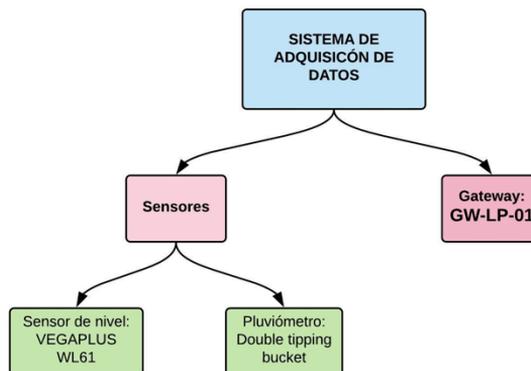


Figura 3. 15 Estructura TOP-DOWN sistema de adquisición de datos

- **Gateway**

Para la adquisición de los datos se utilizó el Gateway de marca BALMART con referencia GW-LP-01. Este dispositivo permite el almacenamiento de información de los diferentes sensores

conectados a sus entradas, así como el envío continuo de los datos mediante su módem GPRS incluido. El GW-LP-01 permite el acceso remoto a la información almacenada vía GPRS a través de un software de control. Asimismo, se puede realizar una descarga de los datos de forma local mediante interfaz de comunicaciones USB. La adquisición de los datos de los sensores conectados a sus entradas es programable y configurable remotamente. La figura 3.16 muestra el Gateway GW-LP-01 y la tabla 3.3 las características técnicas.



Figura 3. 16 Gateway GW-LP-01

Tabla 3. 1 Características técnicas del Gateway GW-LP-01

TIPO	DESCRIPCIÓN
MECÁNICA	Dimensiones: 86x256x58 mm
	Tª Funcionamiento: -40°C a +60°C
	Tª Almacenamiento: -50°C a +70°C
	Humedad en funcionamiento: 5% a 95% RHI
	Sujeción: Carril DIN
ALIMENTACIÓN	Baterías: 3'6V NiMH de alta temperatura 2400 mAh
	Panel solar: Posibilidad de panel solar integrado en caja o externo
	COMUNICACIONES
	Puerto mini-USB tipo B
COMUNICACIONES	Puerto i2C
	Puerto serie para módem GPRS externo
	Puerto RS485
	SOFTWARE
ENTRADA/SALIDA	Sistema operativo: uCOS-II
	Microprocesador: Rabbit 3000
	Salidas:
	3 contactos libres de tensión + 3 salidas de tensión de 3V3, 5V y 18V
	2 salidas digitales
	Entradas:
	4 entradas digitales / contadores de pulsos (alimentadas a 3V3)
	2 contadores de pulsos (alimentados a 3V)
	4 entradas analógicas genéricas (alimentadas a 3V3 ó 5V)
	3 entradas 0..10V ó 4..20mA configurables

- **Pluviómetro**

El pluviómetro empleado es de marca RAINPROF y es de tipo doble cubeta basculante (*double tipping bucket*) con salida digital. La superficie colectora tiene un área de 200 cm² y cada cuchara o *bucket* un tamaño de 0.2 mm. La máxima cantidad de agua medida por minuto es de 12 mm. La figura 3.17 presenta el pluviómetro.



Figura 3. 17 Pluviómetro RAINPROF

- **Sensor de nivel**

El instrumento utilizado para medir el nivel del agua en las calles es el sensor de radar para la medición continua de nivel de agua y agua residual VEGAPLUS WL-61. Desde la antena del sensor de radar se emiten impulsos cortos de radar con una duración aproximada de 1 ns. Dichos impulsos son reflejados por el producto y captados en forma de ecos por la antena. El tiempo de duración de los impulsos

de radar desde la transmisión hasta la recepción es proporcional a la distancia y de esta forma a la altura de llenado. La altura de llenado determinada de esta forma se transforma en una señal de salida correspondiente y emitida como valor medido. La figura 3.18 ilustra el sensor de nivel con tecnología radar.



Figura 3. 18 Sensor de nivel VEGAPLUS WL-61

3.3.2 Sistema de comunicaciones

Para la selección de la plataforma de comunicaciones se tuvo en cuenta tres tecnologías para la comunicación entre los nodos y el centro base: GPRS, Zigbee y IEEE 802.15.4. Existen dos aspectos a considerar desde el punto de vista de las comunicaciones que puede efectuar un nodo. La primera es la referente a la comunicación entre nodos, que puede ser realizada por tecnologías como Zigbee en capa 3 o IEEE 802.15.4. Estas tecnologías podrían tener aplicado un protocolo común, como es el caso de 6LowPan. La otra consideración es relacionada a la comunicación de un nodo con un

centro base. Esto lo haría funcionando como Gateway dentro de la red y utilizando tecnología GPRS. La figura 3.19 presenta la descripción TOP-DOWN para la plataforma de comunicaciones de la red

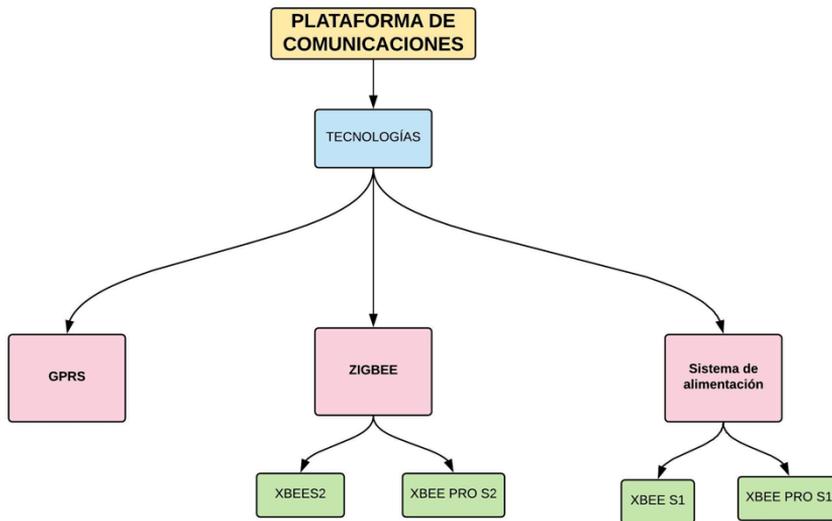


Figura 3. 19 Descripción TOP-DOWN para la plataforma de comunicaciones

En Caicedo-Ortíz et. al [58] se desarrolló una red inalámbricas de sensores para la monitorización de variables atmosféricas. Esta red empleó el dispositivo Wasmote PRO de la empresa Libelium como elemento integrador de los sensores atmosféricos. El Wasmote PRO puede transmitir información a distancias de hasta 7 km con línea de vista entre dispositivos y condiciones ideales utilizando el protocolo ZigBee, y a su vez almacenar estos datos de forma local en el propio dispositivo. Este proyecto realizó tres pruebas para validar el funcionamiento de la red. La primera prueba

se conectó el Wasmote directamente a un equipo de cómputo y obtener la información capturada por los sensores. La segunda prueba se realizaron en campo logrando establecer una comunicación eficiente entre nodo emisor y nodo receptor a una distancia de 1000 m con línea de vista. La tercera prueba se evaluó el enlace entre el nodo y el Gateway para una distancia aproximada de 3500 m con antenas instaladas sobre soportes de 1m y no se estableció el radioenlace.

En Cama-Pinto et. al [59] se implementó una red inalámbrica de sensores para variables atmosféricas utilizando el dispositivo Wasmote de Libelium, pero el envío de los datos se realizó mediante el módulo de radio XBee-PRO ZB (S2). A diferencia de otros módulos el XBee-PRO ZB (S2) de acuerdo a sus características presenta un mayor alcance en su enlace de radio en un solo salto. Se realizaron pruebas *indoor* dentro de un laboratorio y pruebas en espacios exteriores en zonas rurales y urbanas con línea de vista. En ambientes *indoor* el módulo presenta una pérdida de paquetes de hasta el 60% a una distancia de 40 m. Para ambientes exteriores las pérdidas de paquetes es el 0-10 % hasta una distancia de 500m.

Saad et al. [60] realizó un análisis comparativo de los protocolos de comunicación inalámbrica para sensores inteligentes basado en su rendimiento. De este análisis el protocolo GSM / GPRS tiene la velocidad de datos más baja, por lo tanto, su tiempo de transmisión es más largo que los otros protocolos. Del mismo modo, GSM / GPRS tiene el mayor consumo de transmisión de energía, sin embargo, de todos los protocolos revisados tiene la mejor cobertura.

Teniendo en cuenta que las distancias entre un nodo a otro en el arroyo “La 65” superan el rango nominales de enlace exitoso de las tecnologías ZigBee (10 –1000m) [60] y entre los nodos no hay línea de vista se determinó el uso de GPRS para el envío de información hacia el web server.

- **Web server**

El Gateway recibe los datos de los sensores que están conectado a él y envía vía internet la información por medio de un modem GPRS al web server. El web server contiene un software de gestión llamado GREEN WEB MANAGER 2.0 que almacena la información de cada nodo y los sensores asociados a él. La figura 3.20 muestra la interfaz gráfica del software.

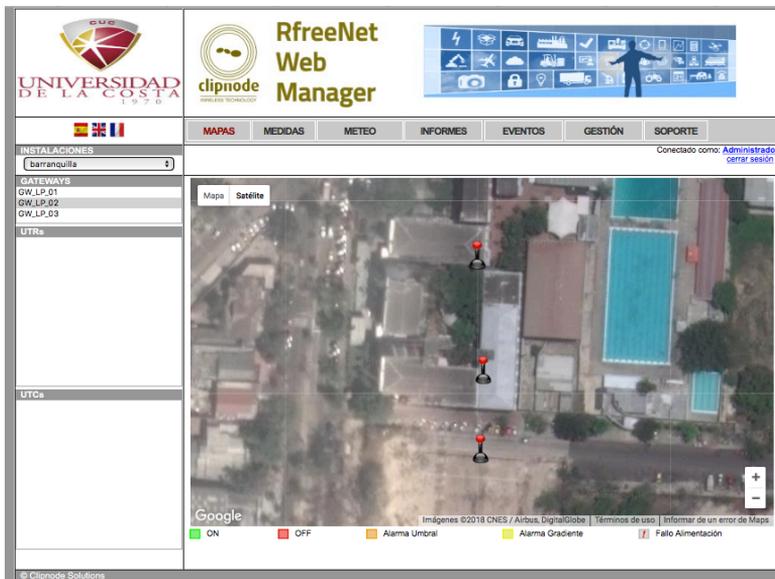


Figura 3. 20 Interfaz gráfica software GREE WEB MANAGER 2.0

La figura 3.21 muestra la información obtenida por cada nodo del cual están conectados el pluviómetro y el sensor de nivel. Asimismo, se puede obtener los datos almacenados en un periodo de tiempo como lo muestra la figura 3.22.



Figura 3. 21 Datos del nodo de cada sensor

Fecha y Hora	Evento	ID Origen	Medida
2015-09-18 21:39:31	Datos de Gateway P2 (Contador Pulso P2)	GW_LP_01	8.67 m
2015-09-18 21:48:43	Datos de Gateway S1 (0.10V4-20mA S1)	GW_LP_01	8.46 m
2015-09-18 21:49:32	Datos de Gateway P2 (Contador Pulso P2)	GW_LP_01	0 mm
2015-09-18 21:47:17	Datos de Gateway S1 (0.10V4-20mA S1)	GW_LP_01	8.47 m
2015-09-18 21:44:14	Datos de Gateway S1 (0.10V4-20mA S1)	GW_LP_01	8.46 m
2015-09-18 21:44:30	Datos de Gateway P2 (Contador Pulso P2)	GW_LP_01	0 mm
2015-09-18 21:42:27	Datos de Gateway S1 (0.10V4-20mA S1)	GW_LP_01	8.47 m
2015-09-18 21:40:00	Datos de Gateway S1 (0.10V4-20mA S1)	GW_LP_01	8.47 m
2015-09-18 21:39:24	Datos de Gateway P2 (Contador Pulso P2)	GW_LP_01	0 mm
2015-09-18 21:37:56	Datos de Gateway S1 (0.10V4-20mA S1)	GW_LP_01	8.44 m
2015-09-18 21:35:29	Datos de Gateway S1 (0.10V4-20mA S1)	GW_LP_01	8.47 m
2015-09-18 21:34:20	Datos de Gateway P2 (Contador Pulso P2)	GW_LP_01	0 mm
2015-09-18 21:33:02	Datos de Gateway S1 (0.10V4-20mA S1)	GW_LP_01	8.46 m
2015-09-18 21:30:58	Datos de Gateway S1 (0.10V4-20mA S1)	GW_LP_01	8.46 m
2015-09-18 21:28:16	Datos de Gateway P2 (Contador Pulso P2)	GW_LP_01	0 mm

Figura 3. 22 Datos almacenados en un periodo de tiempo

3.3.3 Sistema de alimentación

En cada nodo el sensor de nivel, el pluviómetro y el módulo GPRS se encuentran conectados al Gateway el cual es alimentado por un sistema fotovoltaico. La figura 3.23 presente sistema de alimentación de un nodo.

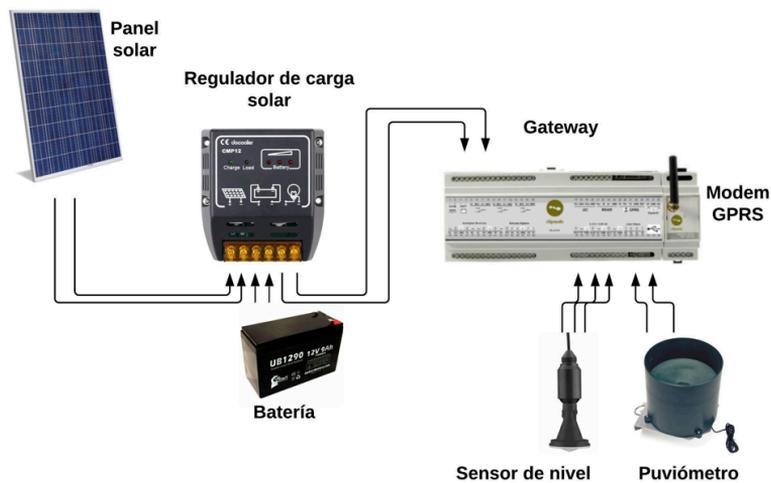


Figura 3. 23 Sistema de alimentación de un nodo.

El sistema de alimentación está compuesto por un panel fotovoltaico, un regulador de carga solar y una batería. Las características del panel solar y la capacidad de las baterías se establecieron teniendo en cuenta el consumo energético de cada uno de los elementos del nodo descritos en la tabla 3.4

Tabla 3. 2 Características de consumo de los elementos de un nodo

EQUIPO	CARACTERÍSTICA	CONSUMO
PLUVIOMETRO	Contacto abierto – cerrado (Suministro de energía a través del Gateway)	N/A
MODEM GSM/GPRS RFIX - GSM 0901	Alimentación: 5V	100mA – 2A
SENSOR DE RADAR VEGAPLUS	Tensión de alimentación: 9V	[4-20]mA
GATEWAY GW-LP-01	Alimentación: Min. 4.5V máx. 5.5V	5mA
PANEL FOTOVOLTAICO	Tensión Nominal 12V- 20W	N/A
BATERIAS LITIO	4,8V- 4800mAh	N/A

La Tabla 3.5 muestra el resumen de consumo total del sistema para una tensión nominal de 12 V y un funcionamiento de 24 horas al día y siete días a la semana (24/7).

Tabla 3.3 Consumo total del sistema (24/7)

Descripción de la carga	Nº de cargas	Intensidad (A)	Tensión (V)	Potencia AC (W)	Ciclo diario (horas/día)	Ciclo mensual (días/semana)	Rendimiento de conversión	Tensión nominal del sistema	Consumo Amp-Hora
Sensor VEGA PULS	1	0,02	10	0,2	24	7	0,9	12	0,44
Módem	1	0,1	5	0,5	24	7	0,9	12	1,11
Gateway	1	0,05	5	0,25	24	7	0,9	12	0,56
				Total 0,95 (W)				Consumo Total (Ah/día)	2,11
Potencia DC Total (W)	Potencia AC Total (W)	Tensión Nominal del Sistema (V)	Intensidad pico (A)	Consumo Total Ah/día	Factor de rendimiento del cableado	Factor de rendimiento de la batería	Consumo Total corregido (Ah/día)		
0	0,95	12	0,08	2,11	0,98	0,95	2,27		

Teniendo en cuenta las características de consumo de la Tabla 3.5 se realizó el cálculo de la potencial generada por el panel solar y la capacidad de la batería para 2 días de autonomía y una máxima profundidad de descarga del 70%. La Tabla 3.6 muestra las características de la batería para suplir la alimentación de un nodo y la Tabla 3.7 la información del módulo fotovoltaico.

Tabla 3. 4 Características de consumo de la batería

Consumo total	Días de autonomía	Máxima profundidad	Corrección por	Capacidad necesaria	Capacidad de	Baterías en
Ah corregido		de descarga	temperatura	de batería (Ah)	la batería seleccionada	paralelo min. Recomendadas
(Ah/día)					(Ah)	
2,27	2	0.7	1	10,48	20	1

Tabla 3. 5 Características técnicas del panel solar

Potencia (W)	Tensión máxima potencia Vmp (V)	Tensión corto circuito Voc (V)	Intensidad máxima potencia Imp (A)	Intensidad corto circuito Ioc (A)
30	18	22,5	1,67	1,85

3.3.4 Sistema de visualización

Debido a la rapidez en la formación de las inundaciones repentinas en la ciudad de Barranquilla, es necesario proveer información sobre el estado del arroyo con una alta resolución temporal. Los pluviómetros están configurados con una resolución temporal de 5 minutos y los sensores de nivel de 2 minutos.

El web server recibe la información de la cantidad de agua que está cayendo durante el evento de lluvia y a través del modelo desarrollado en el presente proyecto se obtiene la cantidad de lluvia

efectiva que se escurre. Un software hidráulico calcula la velocidad del agua v y el nivel de agua de cada sección transversal y ; el producto de $v*y$ determina la peligrosidad en un punto como se describe en el capítulo 2.

Se desarrolló una aplicación Web (<http://www.isatbaq.com.co>) para visualizar la información del nivel de peligrosidad de los puntos de mayor tráfico de vehículos y peatones lo largo del arroyo La 65 y la información se actualiza con cada valor de precipitación recibido por los pluviómetros, es decir, cada 5 minutos. La figura 3.24 muestra la interfaz gráfica de la plataforma.

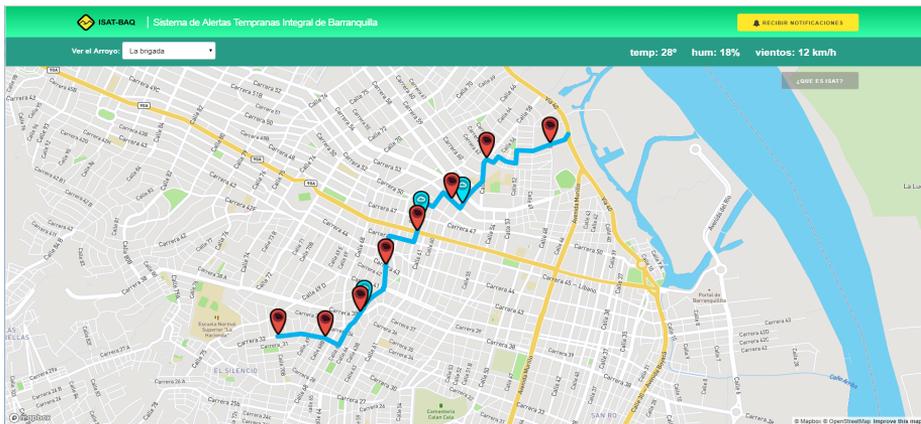


Figura 3. 24 Interfaz gráfica plataforma de visualización

Al seleccionar uno de los puntos en rojo se despliega la información del nivel y velocidad del agua e indica si ese punto es apto para ser cruzado por peatones, vehículos pequeños y/o medianos y buses como lo muestra la figura 3.25. Los íconos cambian entre dos colores, el color verde indica que puede cruzar y rojo que es peligroso y no se puede cruzar.

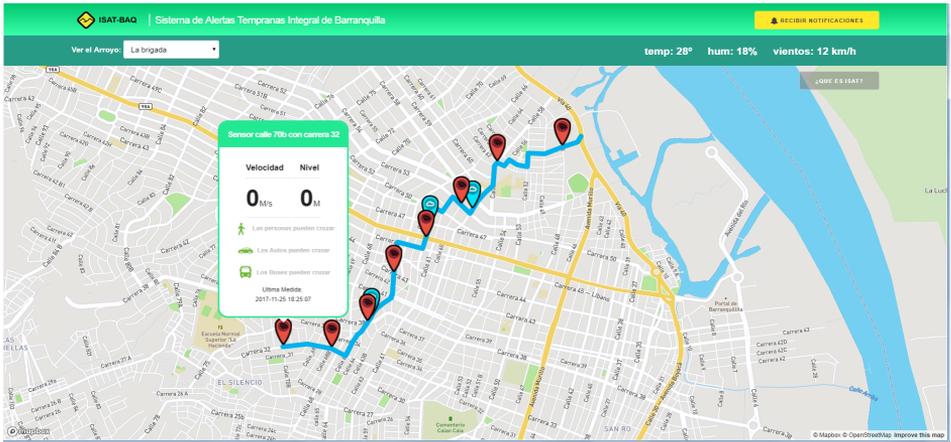


Figura 3. 25 Información de nivel de peligrosidad en punto de observación

Al seleccionar el ícono de color azul se puede observar los datos obtenidos por los pluviómetros en mm como lo muestra la figura 3.26.

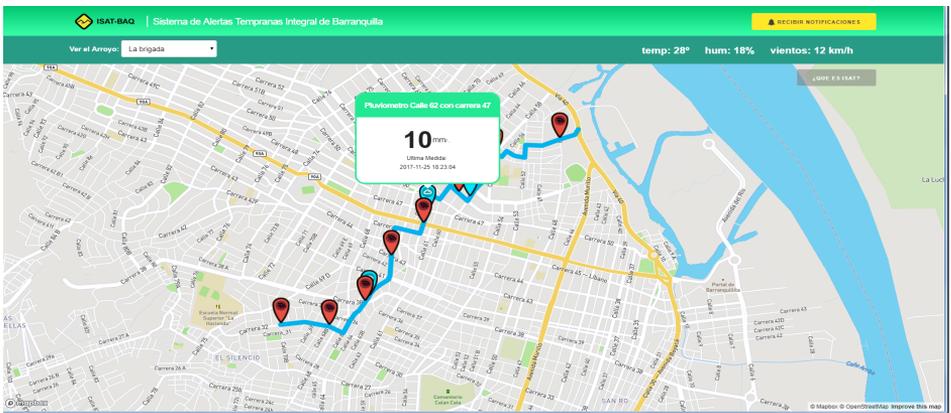


Figura 3. 26 Información de los pluviómetros

La aplicación ofrece la opción de suscribirse para recibir notificaciones durante los eventos de lluvia sobre el estado de

peligrosidad de los puntos de observación y la información obtenida por los pluviómetros a través de las redes sociales Twitter y Telegram. La figura 3.27 ilustra la sección de notificaciones de la aplicación.

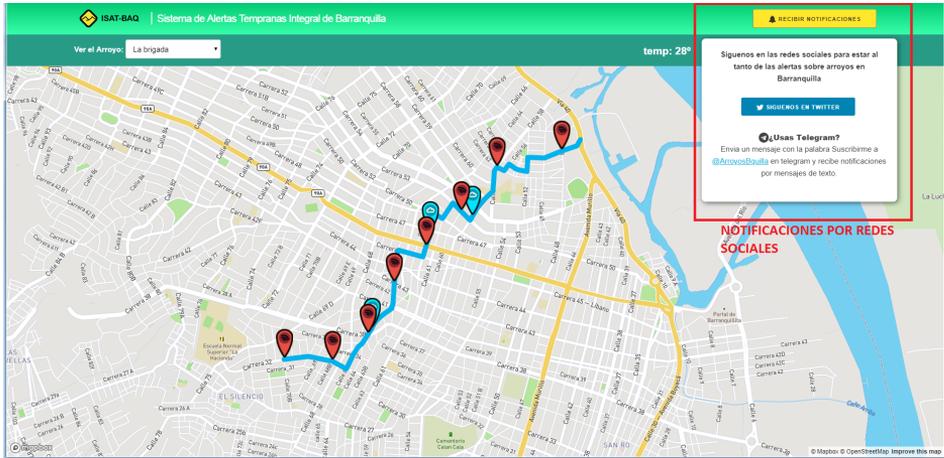


Figura 3. 27 Suscripción para recibir notificaciones del estado del arroyo

Esta aplicación web permite agregar más arroyos e incluir tantos puntos de observación como se desee como pluviómetros. A futuro desplegará la información atmosférica obtenida por diferentes sensores ISAT como lo muestra la figura 3.28

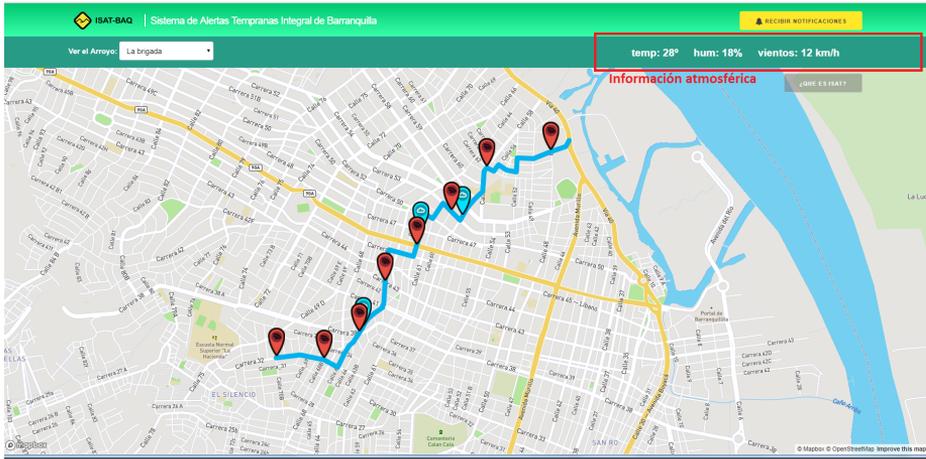


Figura 3. 28 Información de variables atmosféricas

3.4 Modelo hidrológico e hidráulico

El nivel de peligrosidad de las calles durante inundaciones repentinas está determinado por el producto de la velocidad y nivel del agua en un punto de observación como se describió en el capítulo 2. Las variaciones de la lámina de agua y su velocidad dependen de la intensidad y duración de la lluvia, la capacidad del sistema de drenaje de aguas pluviales y las características físicas e hidráulicas de la cuenca.

El objetivo de la modelación matemática del flujo de agua en canales naturales o revestidos, es poder estimar los valores que toman las variables hidráulicas a partir de la resolución por métodos numéricos de unas ecuaciones obtenidas con una serie de hipótesis. Hoy en día se pueden encontrar diferentes programas de modelización hidráulica a distintos niveles de evolución y precisión, desde software unidimensionales (1D), bidimensionales (2D) hasta más complejos como tridimensionales (3D).

El modelo desarrollado en este proyecto utiliza la información de los pluviómetros en tiempo real para conocer la precipitación neta y modelización en 1D para obtener variaciones de velocidad y nivel del agua a lo largo del arroyo durante eventos de lluvia. El modelo se divide en tres secciones: cálculo de la precipitación efectiva y descarga pico de la lluvia; cálculo de la variación del caudal a lo

largo de las secciones transversales y obtención de los valores de velocidad y nivel del agua.

3.4.1 Precipitación efectiva y descarga pico

El escurrimiento es la porción de agua que proviene de la precipitación y alcanza la superficie terrestre luego del proceso de evaporación. Una parte del agua precipitada se infiltra en las capas superiores del suelo hasta que éste se satura; posteriormente, ésta sigue diversos caminos, las depresiones del terreno comienzan a ser llenadas, y al mismo tiempo, el agua se escurre sobre la superficie hasta llegar a la salida de la cuenca [61]. Existen tres tipos de fuentes principales de escurrimiento en cuencas y se clasifican en: flujo sub-superficial, flujo base y escurrimiento directo.

- **Flujo sub-superficial.** Este tipo de flujo se presenta cuando una porción del agua de precipitación que se infiltra escurre cerca de la superficie del suelo y más o menos paralelamente a él; en este caso el flujo superficial es prácticamente nulo.
- **Flujo base:** Este flujo ocurre siempre que un almacenamiento subterráneo, en donde el agua fluye desde dicho almacenamiento hacia los cauces. Los cauces interceptan el agua subterránea, ya sea desde el nivel freático como de acuíferos más profundos.
- **Escurrecimiento directo.** Es aquel volumen asociado a la precipitación en exceso o efectiva. Cuando la intensidad de precipitación es menor que la capacidad de infiltración, el terreno absorberá la mayor parte del volumen de agua que entra como

precipitación. Por el contrario, si la intensidad de precipitación es mayor que la capacidad de infiltración terreno y alcanza el nivel de saturación, la capacidad de infiltración se reduce, de modo que la mayor parte se convertirá en escurrimiento sobre el terreno. También es conocido como precipitación efectiva, neta o en exceso.

Las medidas de precipitación obtenida por los pluviómetros en tiempo real son enviadas al servidor Web y posteriormente procesadas a través de un código desarrollado en el lenguaje de programación Python (Anexo C) para obtener la precipitación efectiva. Este código calcula la precipitación efectiva y la variación del caudal para cada registro de lluvia.

Se utilizó el método propuesto por Servicio de Conservación de Suelos (SCS) para el cálculo de la precipitación efectiva. El SCS propone la siguiente ecuación para el cálculo de la escorrentía:

$$Q = \frac{(P-0.2S)^2}{(P+0.8S)} \quad (1)$$

Donde

Q = Escorrentía (in)

P = Precipitación registrada (in)

S = Retención máxima potencial después de que comience la escorrentía (in)

S depende de las condiciones del suelo y la cubierta de la cuenca hidrográfica de acuerdo al número de curva (NC). NC tiene un rango de 0 a 100, y S está relacionado con CN por:

$$S = \frac{1000}{CN} - 10 \quad (2)$$

Algunos factores determinan la escorrentía el NC, como el grupo hidrológico del suelo, el tipo de cobertura, el tratamiento, la condición hidrológica y la condición de humedad previa. El suelo hidrológico se clasifica en cuatro categorías (A, B, C y D) según el potencial de escorrentía del suelo desnudo después de una humectación prolongada: A (bajo potencial de escorrentía), B (potencial de escorrentía moderadamente bajo), C (Potencial de escorrentía moderadamente alto)) y D (alto potencial de escorrentía) [62].

El tipo de cubierta y el tratamiento del suelo describen el tipo y el estado de la cubierta vegetal. La condición hidrológica se refiere a la capacidad de la superficie de la cuenca hidrográfica para aumentar o evitar la escorrentía directa. Las buenas condiciones hidrológicas indican que el suelo generalmente tiene un bajo potencial de escorrentía para ese grupo específico de suelo hidrológico, tipo de cobertura y tratamiento. La condición de humedad antecedente considera la historia reciente de precipitación y, en consecuencia, es una medida de la cantidad almacenada por la cuenca [62].

Para este proyecto, el número de curva de escorrentía seleccionado es 98 para condiciones de humedad normales en áreas urbanas [62]. Usando la ecuación (1) y (2) y el NC seleccionado, calculamos la precipitación efectiva Q para cada valor recibido de los pluviómetros.

Para seleccionar el número de curva, la cuenca de estudio se dividió en cuatro subcuencas para determinar las zonas impermeables. Un trabajo previo desarrollado por Arrieta & Fernandez [63] determinó el porcentaje de zonas impermeables para cada subcuenca. Se utilizó el levantamiento de topografía y la información proporcionada por el Instituto Geográfico Agustín Codazzi (IGAC) de Colombia, que regula la disponibilidad y los cambios en el propiedades. El sitio web del instituto tiene un visor con el mapa catastral que muestra la información de áreas y lotes construidos. El procedimiento realizado para calcular el porcentaje de impermeabilidad se describe a continuación. Se seleccionaron diferentes polígonos de cada subcuenca como se muestra en la figura 3.29



Figura 3. 29 Polígonos de las sub-cuencas [64]

Una vez que se delimitaron los polígonos, se ubicaron en el plano del visor IGAC y se determinaron el área del lote, el área construida y el área no construida. La figura 3.30 muestra el visor IGAC.



Figura 3. 30 Visor del Instituto Geográfico Agustín Codazzi (IGAC)

Utilizando el plano de la ciudad, se determinó el área de las calles construidas con concreto rígido. Una vez obtenidos los valores de las zonas duras (calles y área construida por lote) se realiza la suma, luego se resta a las áreas no construidas y se obtiene el valor exacto de las áreas impermeables. Finalmente, esta área se divide entre el área total del polígono, obteniendo así el porcentaje de áreas duras.

Para el cálculo de la descarga pico q_p generada por cada medición de precipitación se empleó el método hidrograma unitario sintético del SCS. Este método estima la descarga pico (q_p) y la variación del tiempo de flujo para una lluvia efectiva Pe (mm). La ecuación para q_p es:

$$q_p = 0.208 \frac{(A*Q)}{T_p} (m^3/s) \quad (3)$$

Donde

q_p es la descarga pico (m^3/s)

A es el área de la cuenca (km^2)

T_p el tiempo pico de descarga (hr)

El tiempo pico de descarga T_p se obtiene como:

$$T_p = 0.7T_c \quad (4)$$

T_c es el tiempo de concentración, que es el tiempo requerido para que la escorrentía viaje desde el punto hidráulicamente más distante en la cuenca hidrográfica hasta la salida. El SCS define T_c como:

$$T_c = \frac{\left(\frac{10}{6}\right)L^{0.8}(2540-22.86*NC)^{0.7}}{14104NC^{0.7}Y^{0.5}} \quad (5)$$

Donde

L es el camino más largo a lo largo del cual el agua fluye desde la divisoria de la cuenca hacia la salida (m)

NC número de curva

Y es la pendiente promedio de la cuenca (m/m)

Con el valor de pico de descarga (q_p) y el tiempo pico de descarga (T_p), la variación en tiempo del caudal o escorrentía (q) se determinó usando el hidrograma unitario sintético de SCS.

3.4.2 Variación en tiempo del caudal

El hidrograma unitario sintético desarrollado por el SCS determina la distribución temporal de la escorrentía [5]. Este hidrograma está basado en el análisis de un gran número de cuencas hidrográficas y

tiene una forma similar a la de la mayoría de los hidrogramas de crecidas. La figura 3.31 ilustra la variación de la escorrentía en relación al tiempo. El eje x consta de unidades de tiempo adimensional y eje y de unidades de descarga adimensionales

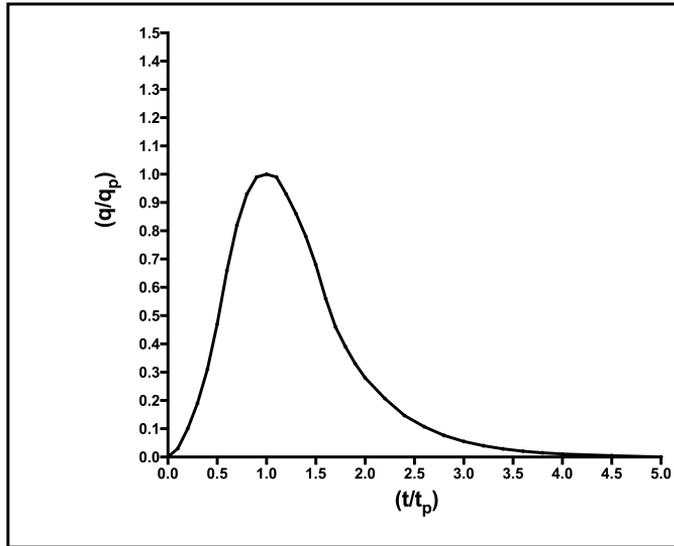


Figura 3. 31 Hidrograma unitario sintético SCS [57]

Para encontrar el valor de la escorrentía q (m^3 / s) para cada instante de tiempo primero se debe obtener el valor de la relación de t/t_p (tiempo/tiempo pico) en ese instante. Cada valor de la relación t/t_p tendrá asociado un valor aproximado de la relación (q/q_p) (escorrentía/descarga pico) como lo muestra la figura 3.28. El valor de la relación q/q_p correspondiente al el instante de tiempo se multiplica por la descarga máxima q_p , de esta manera se obtiene la escorrentía q (m^3 / s) que indica la variación de tiempo del flujo durante el evento de lluvia.

Como a que hay tres pluviómetros instalados, el modelo toma el valor más alto recibido y crea un hidrograma unitario para este

valor. Para cada valor recibido en mm se obtiene un valor de descarga pico qp. La Figura 3.32 ilustra los hidrogramas correspondientes a un evento de lluvia con una duración de 20 minutos, y precipitación total de 11.4 mm; la resolución del pluviómetro es de 5 minutos. El valor t1 es el hidrograma correspondiente a la primera medición de precipitación comenzando en 0 min, t2 es hidrograma de la segunda medición de precipitación registrada comenzando 5 minutos después de t1; t3 es el hidrograma de la tercera medición, t4 es la última medición y el total es el hidrograma acumulativo del evento de lluvia.

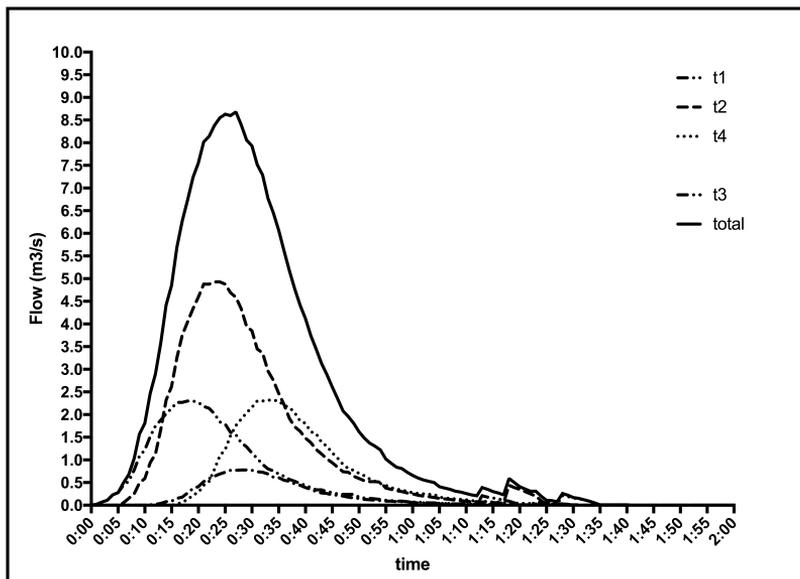


Figura 3. 32 Hidrogramas unitarios de la lluvia [57]

Para poder obtener la variación de la velocidad y nivel del agua a lo largo del tiempo en cada una de las secciones transversales se debe obtener los valores acumulados de los hidrogramas.

La figura 3.33 ilustra cuatro ilustra cuatro hidrogramas acumulativos, donde t1 es el hidrograma de la primera medición de precipitación; c1 es el acumulado para t1 y t2; c2 es el acumulado para c1 y t3 y c3 es el acumulado para c2 y la última medición t4.

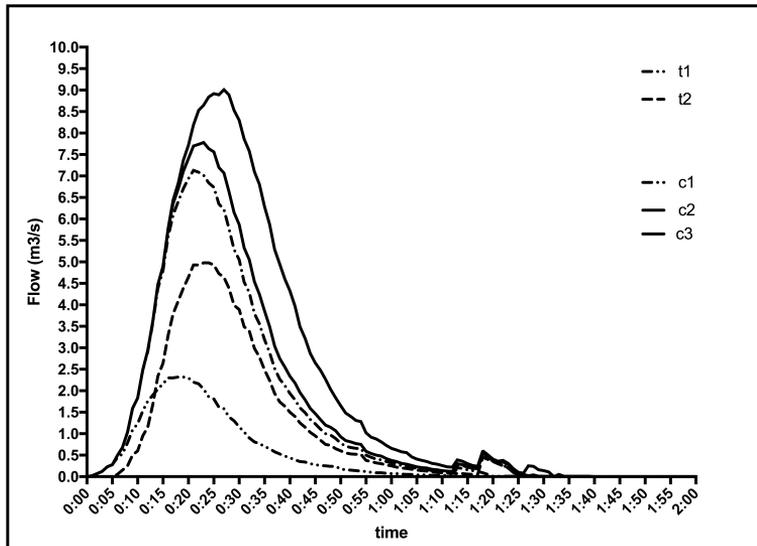


Figura 3. 33 Hidrogramas acumulativos [57]

3.4.3 Variación del nivel y velocidad del agua en la secciones transversales

El modelo desarrollado utiliza el software hidráulico gratuito HEC-RAS desarrollado por el Centro de Ingeniería Hidrológica del Cuerpo de Ingenieros del Ejército de los EE. UU para obtener los valores de nivel del agua y la velocidad del agua. Utilizando la información del levantamiento topográfico como datos de geometría, el modelo realiza un análisis de flujo constante para cada hidrograma acumulado. Se toman las primeras 15 mediciones de flujo de los hidrogramas acumulados y se introducen en la

configuración del análisis del software. Esto predecirá el nivel de riesgo durante los próximos 15 minutos, porque la resolución temporal es de un minuto, pero el modelo permite ajustar esta predicción de tiempo hasta 3 horas más tarde de acuerdo a la gráfica del modelo SCS. Esta información se actualiza cada 5 minutos ya que la resolución actual del pluviómetro es de 5 minutos.

La figura 3.34 ilustra los 15 primeros valores del hidrograma t1 y la figura 3.35 las condiciones de contorno aplicadas aguas arriba y aguas abajo

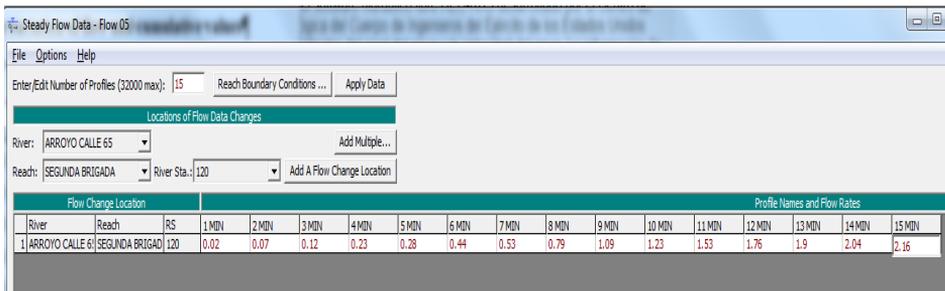


Figura 3. 34 Valores del hidrograma t1 para análisis de flujo constante [57]

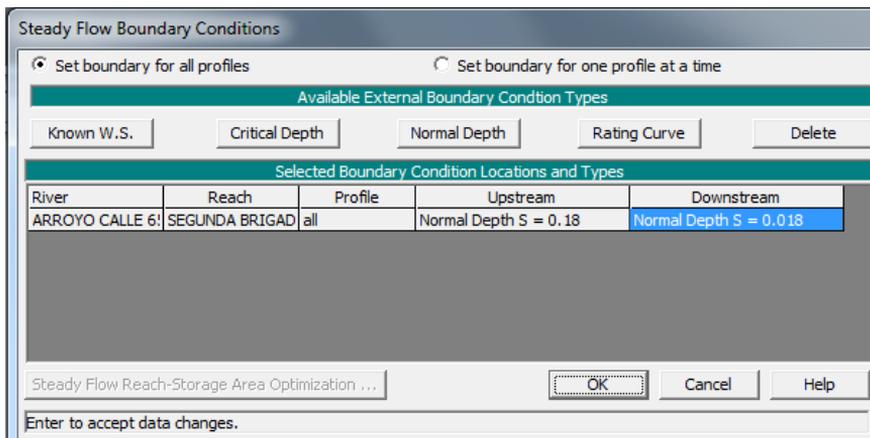


Figura 3. 35 Condiciones de frontera aguas arriba y aguas abajo
[57]

La figura 3.36 presenta la tabla de salida con la variación de tiempo del nivel del agua, la velocidad del agua y el flujo para todas las secciones transversales.

Profile Output Table - Standard Table 1								
HEC-RAS Plan: Unsteady flo River: ARROYO CALLE 65 Reach: SEGUNDA BRIGADA								
Reach	River Sta	Profile	Q Total (m3/s)	Min Ch El (m)	W.S. Elev (m)	Vel Chnl (m/s)	Flow Area (m2)	
SEGUNDA BRIGADA	120	1 MIN	0.02	86.08	86.09	0.25	0.08	
SEGUNDA BRIGADA	120	2 MIN	0.07	86.08	86.09	0.87	0.08	
SEGUNDA BRIGADA	120	3 MIN	0.12	86.08	86.09	1.08	0.11	
SEGUNDA BRIGADA	120	5 MIN	0.28	86.08	86.10	1.50	0.19	
SEGUNDA BRIGADA	120	6 MIN	0.44	86.08	86.10	1.78	0.25	
SEGUNDA BRIGADA	120	7 MIN	0.53	86.08	86.11	1.91	0.28	
SEGUNDA BRIGADA	120	8 MIN	0.79	86.08	86.11	2.21	0.36	
SEGUNDA BRIGADA	120	9 MIN	1.09	86.08	86.12	2.49	0.44	
SEGUNDA BRIGADA	120	10 MIN	1.23	86.08	86.12	2.60	0.47	
SEGUNDA BRIGADA	120	11 MIN	1.53	86.08	86.12	2.82	0.54	
SEGUNDA BRIGADA	120	12 MIN	1.76	86.08	86.12	2.96	0.59	
SEGUNDA BRIGADA	120	13 MIN	1.90	86.08	86.13	3.05	0.62	
SEGUNDA BRIGADA	120	14 MIN	2.04	86.08	86.13	3.12	0.65	
SEGUNDA BRIGADA	120	15 MIN	2.16	86.08	86.13	3.19	0.68	
SEGUNDA BRIGADA	119	1 MIN	0.02	84.93	84.97	0.81	0.02	
SEGUNDA BRIGADA	119	2 MIN	0.07	84.93	85.00	0.58	0.12	
SEGUNDA BRIGADA	119	3 MIN	0.12	84.93	85.02	0.61	0.20	
SEGUNDA BRIGADA	119	5 MIN	0.28	84.93	85.04	0.77	0.37	
SEGUNDA BRIGADA	119	6 MIN	0.44	84.93	85.06	0.92	0.48	
SEGUNDA BRIGADA	119	7 MIN	0.53	84.93	85.06	0.99	0.53	
SEGUNDA BRIGADA	119	8 MIN	0.79	84.93	85.08	1.17	0.68	
SEGUNDA BRIGADA	119	9 MIN	1.09	84.93	85.10	1.34	0.82	
SEGUNDA BRIGADA	119	10 MIN	1.23	84.93	85.11	1.41	0.88	
SEGUNDA BRIGADA	119	11 MIN	1.53	84.93	85.12	1.54	0.99	
SEGUNDA BRIGADA	119	12 MIN	1.76	84.93	85.13	1.63	1.08	
SEGUNDA BRIGADA	119	13 MIN	1.90	84.93	85.14	1.69	1.13	
SEGUNDA BRIGADA	119	14 MIN	2.04	84.93	85.14	1.74	1.18	
SEGUNDA BRIGADA	119	15 MIN	2.16	84.93	85.15	1.78	1.21	

Figura 3. 36 Tabla de salida de variación del nivel y velocidad del agua

La diferencia entre la elevación de la superficie del agua (W.S. Elev) y la mínima elevación del canal (Min. Ch. El) es el nivel del agua (y) y el producto del nivel del agua multiplicado por vel. Ch es el nivel de riesgo de la sección transversal.

$$\text{Nivel del agua}_{(sección transversal)} = W.S.Elev. (m) - \text{Min. Ch. Elev. (m)} \quad (6)$$

$$\text{Nivel del agua (y)} * \text{Vel. Chn. (v)} = \text{Nivel de peligrosidad (m}^2/\text{s)} \quad (7)$$

En el capítulo 4 se presentan los resultados obtenidos del modelo propuesta y se compara su efectividad con los datos medidos en tiempo real con los sensores de nivel y el cálculo de la velocidad para determinar el nivel de peligrosidad en diferentes secciones transversales.

Capítulo 4: Resultados

Esta sección se presenta los resultados de nivel de agua, velocidad de agua y peligrosidad obtenidos con el modelo desarrollado en este proyecto y su comparación con los datos medidos por los sensores en diferentes secciones transversales para comprobar la efectividad del modelo. Se analizaron dos eventos de lluvias muy fuertes de acuerdo la Agencia Estatal de Meteorología (AEMET) [8], uno de duración de 20 minutos y el segundo de 105 minutos.

Para cada evento de lluvia se presentan los registros de precipitación del pluviómetro, los valores de nivel de agua medidos con el sensor VEGAPULS y la velocidad en las secciones transversales. Los datos de velocidad se calcularon utilizando la ecuación de Manning descrita en el capítulo 2, donde se relacionan las variables físicas de la sección transversal, el nivel medido y la velocidad del agua.

El código desarrollado en Python (anexo 3) obtiene la precipitación neta y el hidrograma unitario sintético para cada valor de precipitación leído por el pluviómetro y el hidrograma acumulado. Asimismo, se presenta la variación de la velocidad y nivel del agua obtenidos con el software HEC-RAS durante el evento de lluvia para las secciones transversales comparadas.

4.1 Evento 1.

Se seleccionó un evento de lluvia muy fuerte registrado por los nodos 1 y 3 que tuvo una duración de 20 minutos, intensidad total de 11.4 mm (34.2 mm/hr). Los pluviómetros se configuraron con una resolución temporal de 5 minutos y los sensores de nivel de 2 minutos. La Tabla 4.1 muestra los registros de precipitación para este evento.

La Tabla 4.2 presenta las características físicas de la sección transversal asociada al nodo 1 y 3 donde M es el coeficiente de rugosidad, B el ancho de la sección y S la pendiente promedio. La Tabla 4.3 presenta los valores de nivel medidos con el sensor VEGAPULS. Los valores de velocidad fueron calculados utilizando los valores de nivel medido y la ecuación de Manning descrita en el capítulo anterior.

Tabla 4. 1 Precipitación Evento 1

Tiempo	Precipitación (mm)	
13:10	2.8	t1
13:15	2	t2
13:20	3.8	t3
13:25	2.8	t4
TOTAL	11.4	

Tabla 4. 2 Variables físicas de las secciones transversales del nodo 1 y 3

VARIABLES	NODO 1	NODO 3
M (Manning)	0,015	0,015
B	6,800	10,000
Cota mayor	58,810	30,260
Cota menor	58,230	28,870
S	0,015	0,028

Tabla 4. 3 Valores de nivel y velocidad del agua medidos Evento 1

NODO 1			NODO 3	
HORA	NIVEL (m)	VELOCIDAD (m/s)	NIVEL (m)	VELOCIDAD (m/s)
13:12	0,02	0,59	0,04	1,04
13:14	0,07	1,35	0,05	1,21
13:16	0,08	1,47	0,07	1,51
13:18	0,1	1,7	0,08	1,64
13:20	0,11	1,8	0,1	1,9
13:22	0,17	2,38	0,12	2,14
13:24	0,24	2,96	0,16	2,58
13:26	0,3	3,4	0,17	2,68
13:28	0,32	3,54	0,18	2,78
13:29	0,35	3,73	0,19	2,88
13:30	0,35	3,73	0,2	2,98
13:30	0,35	3,73	0,21	3,07
13:32	0,35	3,73	0,21	3,07
13:34	0,35	3,73	0,21	3,07
13:36	0,35	3,73	0,21	3,07

4.1.1 Hidrograma Evento 1

La gráfica 4.1 muestra los hidrogramas para cada valor registrado del Evento 1 y la figura 4.2 los hidrogramas acumulados donde ta_1 es el hidrograma acumulado entre t_1 y t_2 , ta_2 es el acumulado entre t_1 y t_3 y ta_3 es el acumulado entre ta_2 y t_4 .

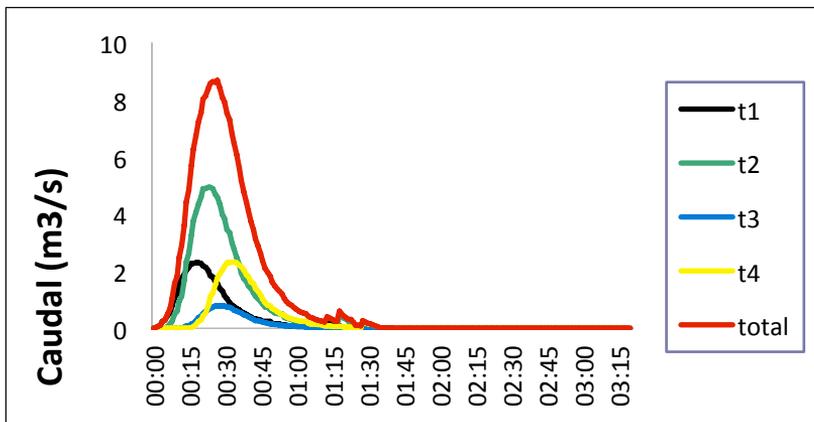


Figura 4. 1 Hidrogramas unitarios sintéticos Evento 1

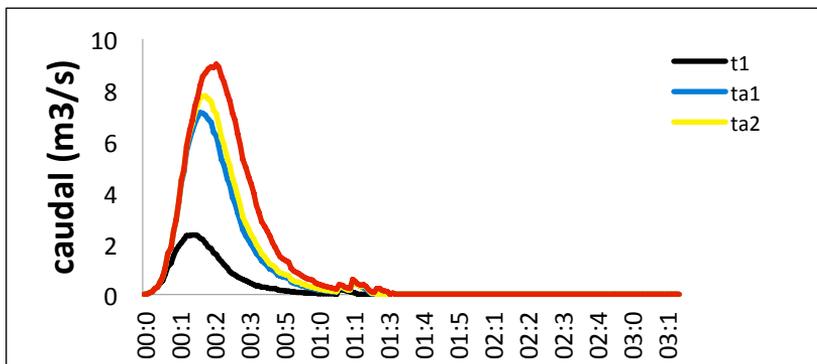


Figura 4. 2 Hidrogramas acumulado Evento 1

4.1.2 Nivel y velocidad del agua obtenidos por el modelo Evento 1

El nodo 1 y nodo 3 corresponden a la sección transversal 85 y 35 respectivamente y la distancia entre ambos nodos es de aproximadamente 1.5 km. La tabla 4.4 presenta los valores de nivel y velocidad del agua calculada por el modelo desarrollado en esta tesis y su variación durante el evento de lluvia

Tabla 4. 4 Valores de nivel y velocidad del agua obtenidos por el modelo para el Evento 1

NODO 1			NODO 3	
HORA	NIVEL	VELOCIDAD	NIVEL	VELOCIDAD
13:10:00	0,06	0,58	0,04	0,02
13:12:00	0,09	0,71	0,05	0,04
13:14:00	0,12	0,9	0,07	0,97
13:16:00	0,16	1,19	0,09	1,25
13:18:00	0,19	1,54	0,11	1,46
13:20:00	0,23	1,92	0,13	1,69
13:22:00	0,28	2,29	0,15	1,93
13:24:00	0,35	2,67	0,16	2,18
13:26:00	0,35	2,82	0,18	2,29
13:28:00	0,37	2,94	0,19	2,39
13:30:00	0,38	3	0,19	2,55
13:32:00	0,38	3,04	0,20	2,66
13:34:00	0,38	3,05	0,20	3,01

13:36:00	0,38	3,05	0,20	3,01
13:38:00	0,38	3,05	0,20	3,01

La gráfica 4.3 comparan los niveles de agua entre los datos y medidos para el nodo 1.

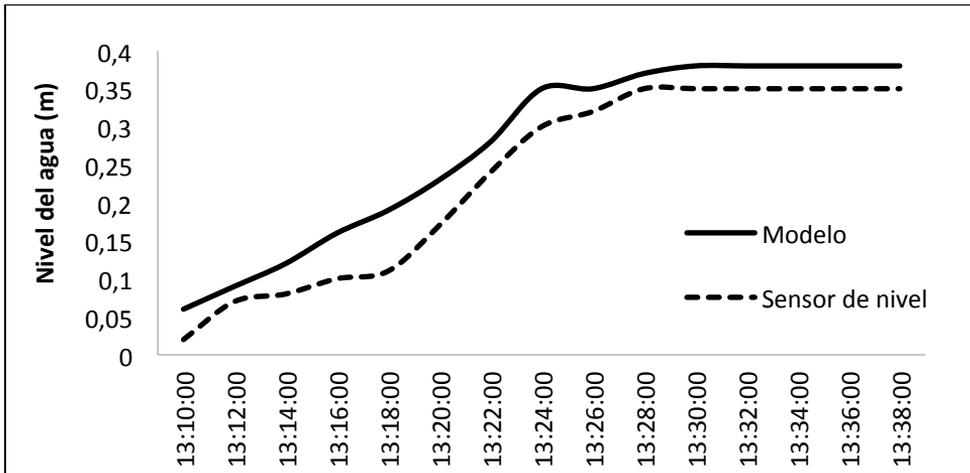


Figura 4. 3 Comparación nivel de agua Evento 1 Nodo 1 [64]

De la gráfica 4.3 se puede observar que los valores obtenidos por el modelo son ligeramente mayor a los medidos por el sensor, con una diferencia mínima de 2 cm y máxima de 8 cm.

La gráfica 4.4 compara los valores de nivel de agua obtenidos por el modelo y los medidos por el sensor para el nodo 3.

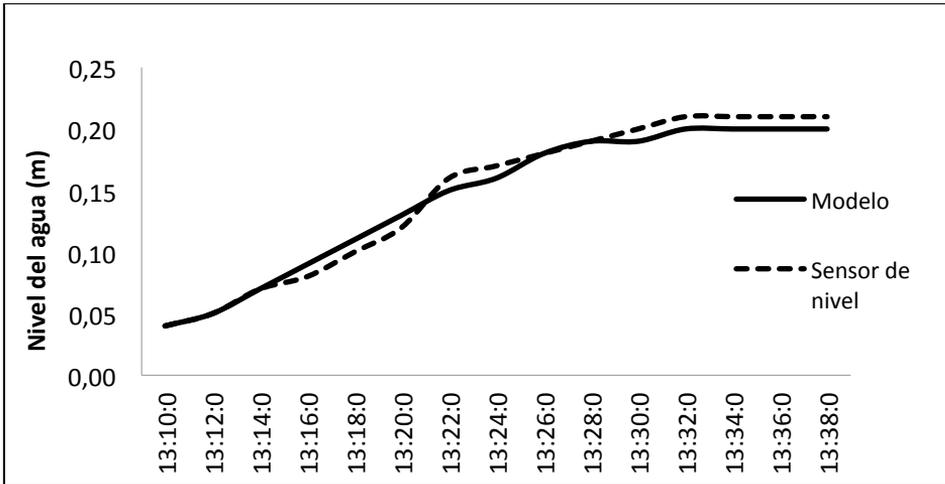


Figura 4. 4 Comparación nivel de agua Evento 1 Nodo 3 [64]

Para el nodo 3 los datos de nivel obtenidos por el modelo y los medidos son muy cercanos con una diferencia máxima de 1 cm.

Las gráficas 4.5 y 4.6 comparan las velocidades calculadas y los valores obtenidos por el modelo para los nodos 1 y 3 durante el Evento 1.

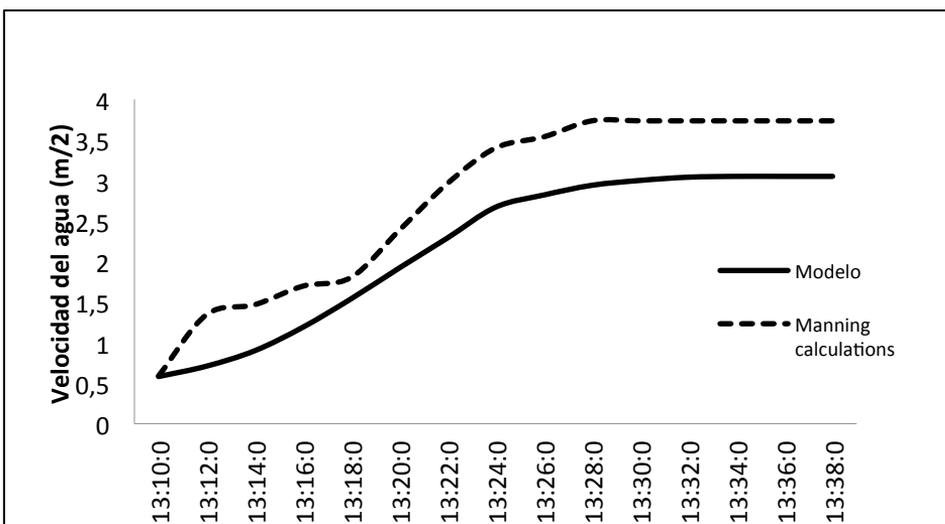


Figura 4. 5 Comparación velocidad de agua Evento 1 Nodo 1 [64]

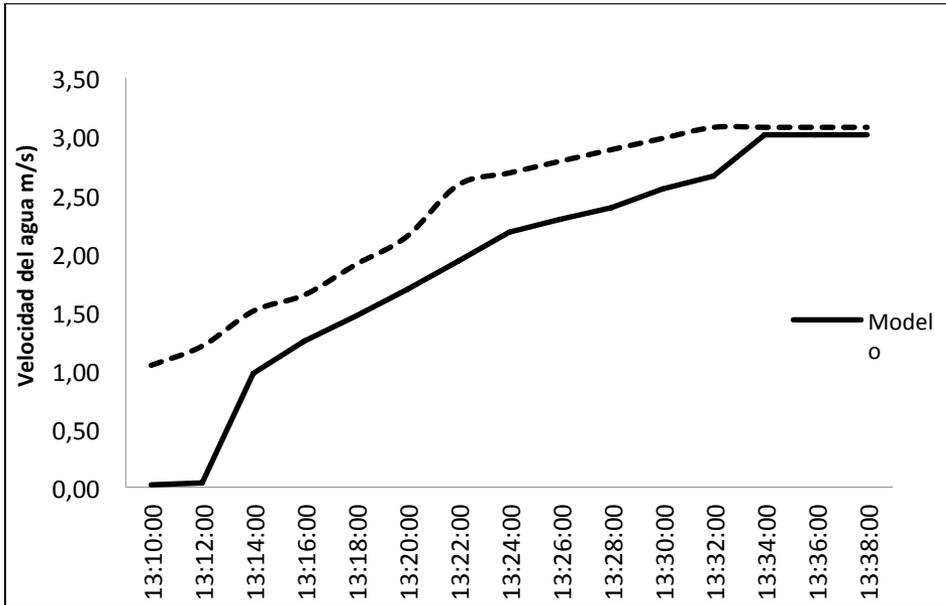


Figura 4. 6 Comparación velocidad de agua Evento 1 Nodo 3 [64]

En el caso de la velocidad del agua, los datos obtenidos por el modelo se compararon con los datos estimados utilizando la fórmula de Manning. De las gráficas 4.5 y 4.6 se observa que los datos calculados son ligeramente mayor que los obtenidos por el modelo. Para el nodo 1, la diferencia mínima entre los datos es de 0.01 m/s y la máxima de 0.79 m/s. Para el nodo 3, la diferencia mínima es de 0.06 m/s y la máxima de 1.17 m/s.

4.1.3 Nivel de peligrosidad Evento 1

El nivel de peligrosidad en una sección transversal se obtiene como el producto de la velocidad del agua con el nivel del agua en un tiempo determinado. Las gráficas 4.7 y 4.8 comparan los niveles de

peligrosidad medidos y obtenidos por el modelo de los nodos 1 y 3 respectivamente durante el Evento 1.

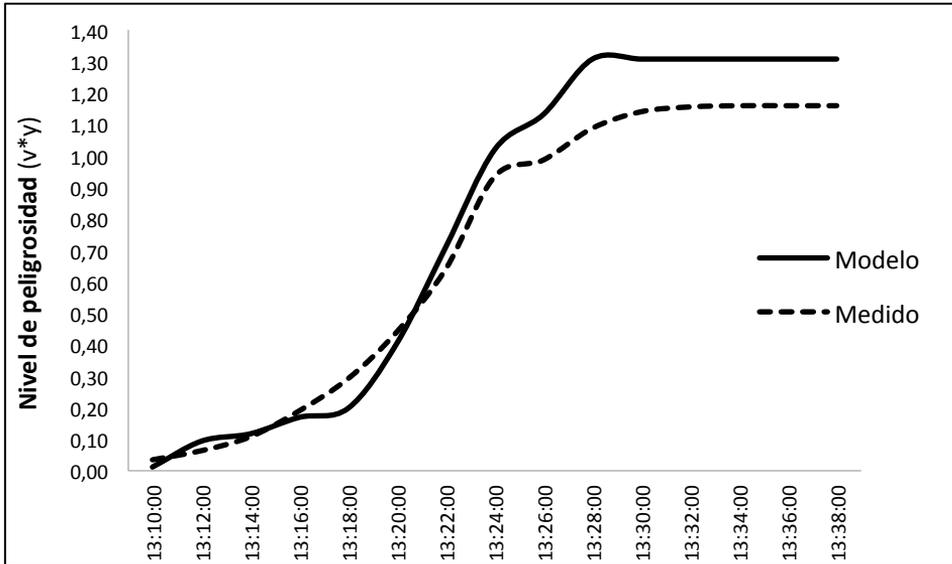


Figura 4. 7 Nivel de peligrosidad Nodo 1 Evento 1 [64]

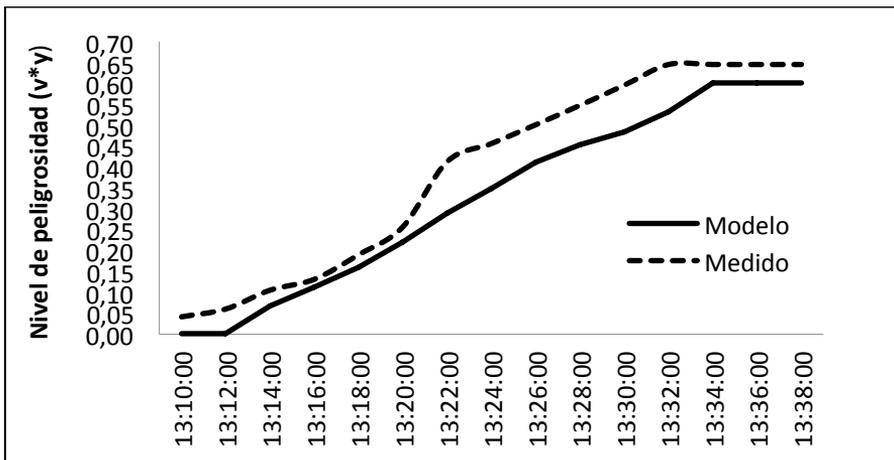


Figura 4. 8 Nivel de peligrosidad Nodo 3 Evento 1 [64]

Dado que el umbral de riesgo seleccionado para peatones es $0.22 \text{ m}^2 / \text{s}$, para el nodo 1, el producto del sensor de nivel de agua multiplicado por la velocidad calculada del agua ($v_c * y_m$) detectó que la corriente se volvió peligrosa para los peatones a las 13:18 con un nivel de riesgo de $0.29 \text{ m}^2/\text{s}$, 8 minutos después de que comenzó a llover. Según los datos obtenidos por el modelo de esta tesis, la corriente se volvió peligrosa para los peatones a las 13:20, 2 minutos más que los datos arrojados por los sensores.

Para el nodo 3, los valores medidos y el modelo propuesto no mostraron ninguna diferencia en el tiempo para los peatones; ambos registraron el nivel de riesgo a las 13:20, 10 minutos después de que comenzó a llover.

Los criterios para vehículos obtenidos por Martínez-Gomariz et. al [24] proponen que para los vehículos mini, livianos y compactos la corriente es peligrosa cuando la relación v y alcanza un valor entre $0.49\text{-}0.64 \text{ m}^2/\text{s}$. Para el nodo 1, la peligrosidad del arroyo alcanza un valor de $0,64 \text{ m}^2 / \text{s}$ a las 13:22, 2 minutos después de la alerta emitida para los peatones. Además, para el nodo 3, la corriente se vuelve peligrosa para este tipo de vehículos a las 13:22, solo dos minutos de diferencia con la alerta emitida para los peatones que se encuentran en ese punto.

Teniendo en cuenta que la diferencia en el tiempo en que la corriente se vuelve peligrosa para peatones y vehículos es muy pequeña, se ratifica el uso del criterio más restrictivo de $0.22 \text{ m}^2/\text{s}$ tanto para peatones como para vehículos mini, livianos y compactos.

4.2 Evento 2

Los nodos 1 y 3 registraron un evento de lluvia muy fuerte con una duración de 105 min y una intensidad total de 86.4 mm (49.37 mm/hr). La Tabla 4.5 presenta los datos de precipitación del evento 2.

Tabla 4. 5 Precipitación Evento 2

Tiempo	Precipitación (mm)	Tiempo	Precipitación (mm)
9:52	1,2	10:48	1,2
9:57	0	10:53	0,6
10:02	1,2	10:58	0,8
10:07	8	11:03	0,6
10:12	9,2	11:08	0,6
10:17	11,8	11:13	1,4
10:23	16,8	11:18	0,8
10:28	13,6	11:23	0,2
10:33	11,8	11:29	0
10:38	5,8	11:34	0,4
10:43	1,6	TOTAL	86,4

Los valores de nivel y velocidad del agua del nodo 1 se presentan en la Tabla 4.6. Los valores asociados al nodo 3 se muestran en la Tabla 4.7.

Tabla 4. 6 Valores de nivel y velocidad del agua medidos Nodo 1 (Evento 2)

TIEMPO	NODO 1		TIEMPO	NODO 1	
	NIVEL	VELOCIDAD		NIVEL	VELOCIDAD
9:51	0	0	11:19	0,11	2
10:01	0	0	11:26	0,08	1,95
10:08	0,01	1,3	11:34	0,08	1,5
10:10	0,05	1,5	11:36	0,07	1,43
10:15	0,11	2,1	11:38	0,07	1,37
10:17	0,15	2,8	11:41	0,07	1,25
10:19	0,17	2,9	11:48	0,06	1,27
10:22	0,24	3,26	11:50	0,05	0,89
10:24	0,27	3,42	11:52	0,05	0,7
10:27	0,31	3,88	11:57	0,04	0,6
10:29	0,39	5,9	12:02	0,03	0,4
10:31	0,42	6,3	12:07	0,03	0,32
10:34	0,41	5,8	12:09	0,01	0,31
10:37	0,4	5,5	12:14	0	0
10:39	0,4	5,4	12:17	0	0
10:41	0,39	5,3	12:19	0	0
10:43	0,38	4,63	12:21	0	0
10:48	0,36	4,53	12:25	0	0
10:51	0,33	3,88	12:32	0	0
10:53	0,33	3,88	12:37	0	0
10:58	0,25	3,26	12:40	0	0
11:00	0,21	2,92	12:43	0	0
11:02	0,19	2,74	12:46	0	0
11:05	0,18	2,92	12:53	0	0
11:07	0,14	2,6	12:55	0	0
11:10	0,14	2,6	12:58	0	0
11:12	0,13	2,4	13:00	0	0
11:16	0,12	2,2			

Tabla 4. 7 Valores de nivel y velocidad del agua medidos Nodo 3
(Evento 2)

TIEMPO	NODO 3		TIEMPO	NODO 3	
	NIVEL	VELOCIDAD		NIVEL	VELOCIDAD
9:51	0,03	0,02	11:19	0,15	3,11
10:01	0,04	0,07	11:26	0,14	2,97
10:08	0,08	0,27	11:34	0,1	2,38
10:10	0,1	0,4	11:36	0,12	2,69
10:15	0,12	0,39	11:38	0,1	2,38
10:17	0,17	0,7	11:41	0,14	2,97
10:19	0,25	1,9	11:48	0,07	1,88
10:22	0,29	2,5	11:50	0,08	2,05
10:24	0,28	4,68	11:52	0,07	0,6
10:27	0,33	5,21	11:57	0,08	0,5
10:29	0,37	5,61	12:02	0,08	0,3
10:31	0,39	5,8	12:07	0,05	0,2
10:34	0,37	5,61	12:09	0,08	0,1
10:37	0,38	5,9	12:14	0,07	1,88
10:39	0,4	5,9	12:17	0,05	1,5
10:41	0,39	5,8	12:19	0,03	1,07
10:43	0,37	5,61	12:21	0,03	1,07
10:48	0,36	5,51	12:25	0,04	1,3
10:51	0,36	5,51	12:32	0,04	1,3
10:53	0,32	5,11	12:37	0,01	0,52
10:58	0,26	4,46	12:40	0,05	1,5
11:00	0,17	3,38	12:43	0,01	0,52
11:02	0,17	3,38	12:46	0,04	1,3
11:05	0,17	3,38	12:53	0,03	1,07
11:07	0,17	3,38	12:55	0,05	1,5
11:10	0,15	3,11	12:58	0	0
11:12	0,15	3,11	13:00	0,05	1,5
11:16	0,12	2,69			

4.2.1 Hidrograma Evento 2

La gráfica 4.9 muestra los hidrogramas para cada valor registrado del Evento 2 y la gráfica 4.10 los hidrogramas acumulados.

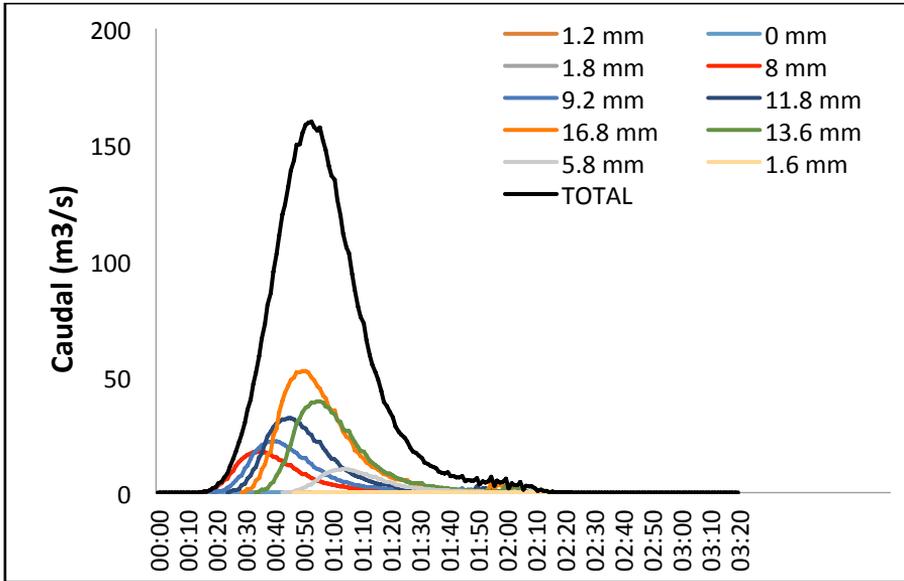


Figura 4. 9 Hidrograma unitario sintético Evento 2

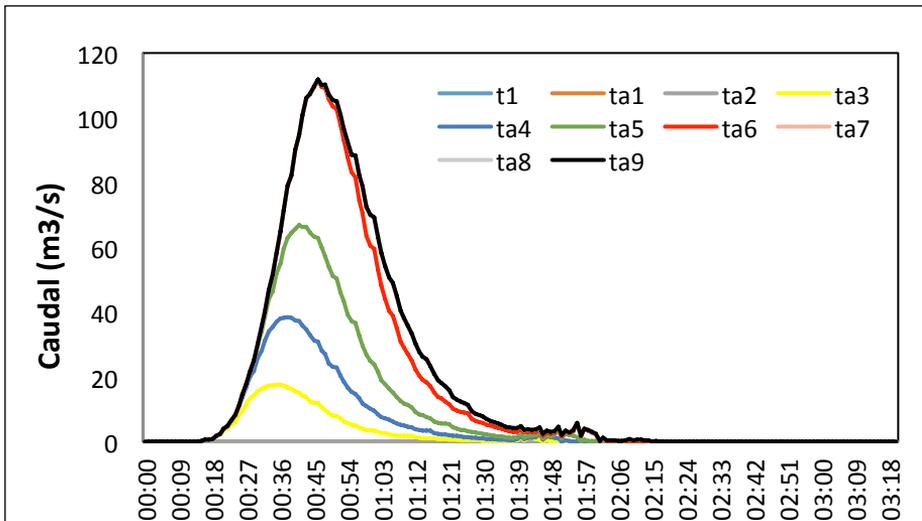


Figura 4. 10 Hidrograma acumulado Evento 2

4.2.2 Nivel y velocidad del agua obtenidos por el modelo Evento 2

Las figuras 4.11 y 4.12 muestran la variación del nivel del agua obtenidos por el modelo para los nodos 1 y 3 respectivamente comparados con los datos medidos con el sensor de nivel para el Evento 2.

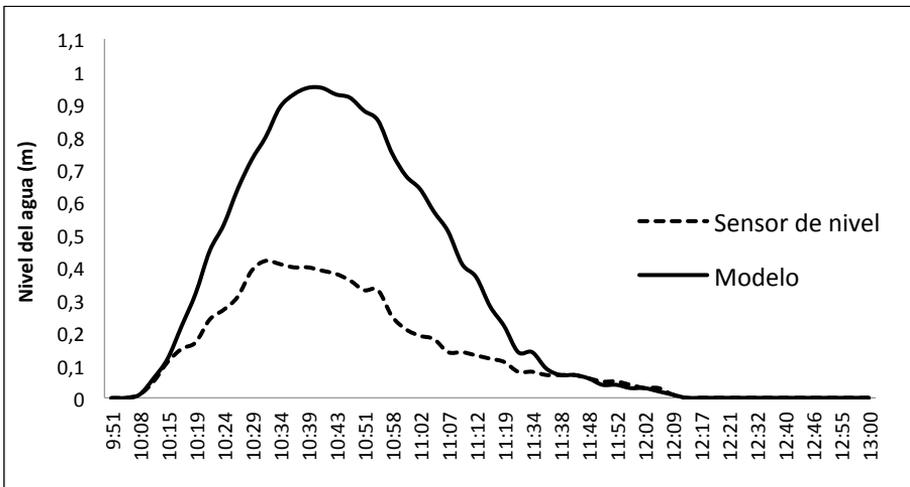


Figura 4. 11 Comparación nivel de agua Evento 2 Nodo 1 [64]

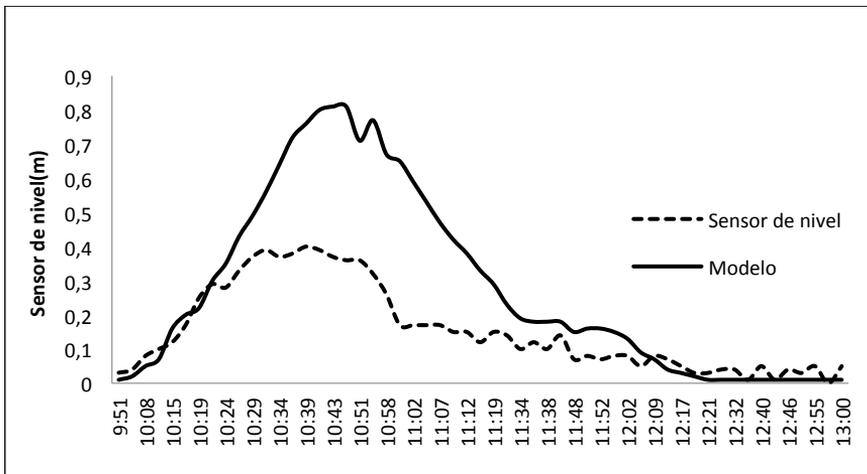


Figura 4. 12 Comparación nivel de agua Evento 2 Nodo 3 [64]

De las figuras 4.11 y 4.13 en el intervalo [10:19 - 11:52] podemos notar una diferencia significativa entre los valores de nivel medidos y obtenidos por el modelo. Lo anterior ocurre durante evento de lluvia de alta intensidad y duración debido al desbordamiento de las secciones transversales. Cuando la descarga pico q_p de una lluvia efectiva es mayor que la máxima descarga máxima en la sección transversal (Mq_p), se produce un desbordamiento, lo que dificulta el cálculo del flujo real en las secciones transversales. El modelo desarrollado estima la altura que puede alcanzar el agua sin considerar el desbordamiento en las secciones transversales.

Usando la geometría de sección transversal (ancho, altura de bordillos, longitud e inclinación) y un coeficiente de rugosidad de Manning de 0.015, se calculó la descarga pico (q_p) para cada sección transversal antes del desbordamiento. La pendiente promedio del canal es 1.8%, la altura promedio del bordillo es 0.54m y el ancho de las secciones transversales está en el rango de 5.6m-22.94 m. La descarga máxima tiene un rango de 3.47 m³/s-113.16 31.54 m³/s y un promedio de 31.64 m³/s. Debido a la alta velocidad de flujo y al riesgo de desbordamiento, como una solución de emergencia, las personas han construido paredes a lo largo de la corriente para evitar inundaciones y daños a sus propiedades, lo que cambia la geometría del canal con el tiempo. Por lo tanto, durante eventos de alta precipitación, el desbordamiento puede ocurrir en algunas secciones transversales, mientras que en otras no. La figura 4.13 muestra el caudal máximo para cada sección transversal.

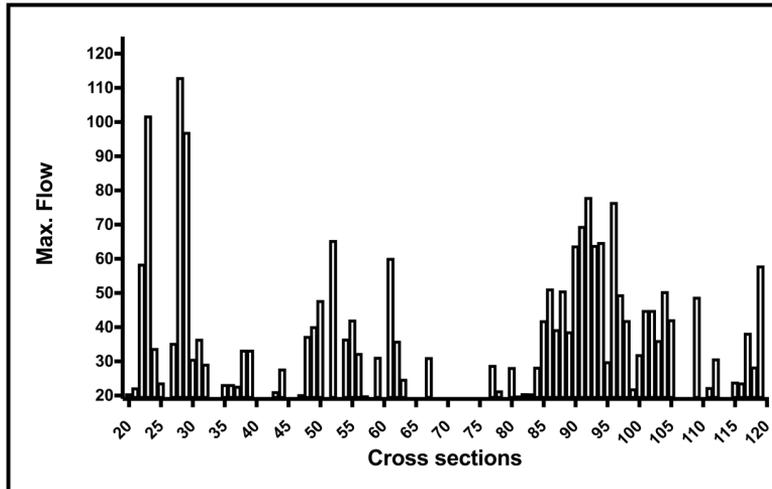


Figura 4. 13 Caudal máximo en las secciones antes del desbordamiento [64]

A continuación la figura 4.14 compara la variación de velocidad del agua durante el evento 2 para el nodo 1.

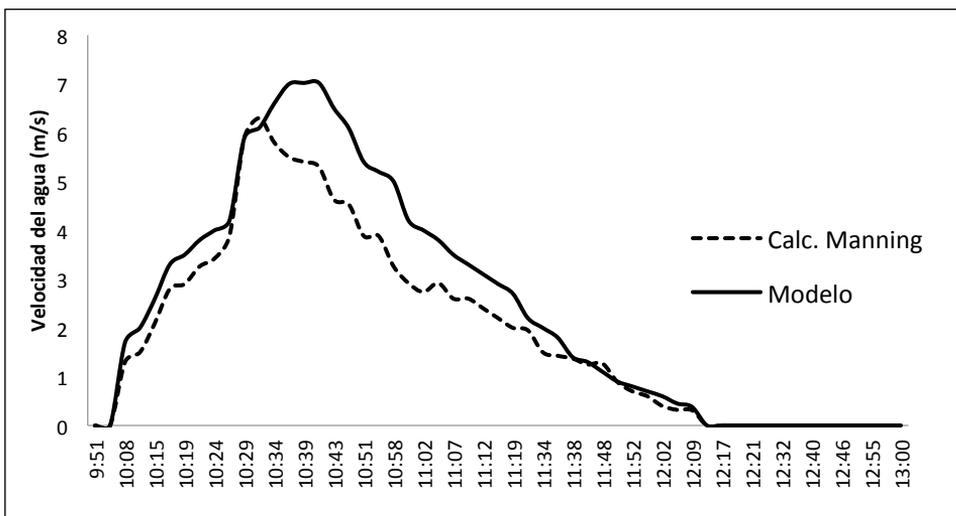


Figura 4. 14 Comparación velocidad de agua Evento 2 Nodo 1 [64]

De la figura 4.14 se puede observar que al inicio y fin del evento de lluvia 2, la diferencia entre los datos arrojados por el modelo y los calculados es despreciable. En cuanto a la velocidad máxima de la sección transversal del nodo 1, el modelo obtuvo un valor de 7.33 m/s y los datos calculados una velocidad máxima de 5.9 m/s.

La figura 4.15 compara la variación de velocidad del agua durante el evento 2 para el nodo 3.

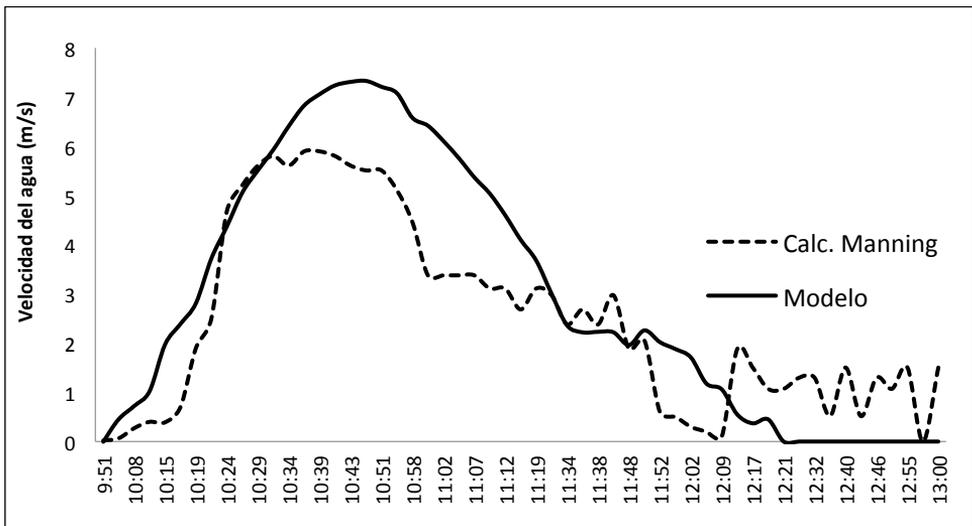


Figura 4. 15 Comparación velocidad de agua Evento 2 Nodo 3 [64]

Al igual que el nodo 1, para el nodo 3 la velocidad máxima obtenida por el modelo propuesto es de 7.33 m/s y los datos calculados es 5.9 m/s. Sin embargo, la curva obtenida por el modelo presenta mayor estabilidad al final del evento de lluvia que la curva asociada a los datos calculados como se observa en la figura 4.15.

4.2.3 Nivel de peligrosidad Evento 2

La comparación del nivel de peligrosidad para el Evento 2 se ilustra en las figuras 4.15 y 4.16 para los nodos 1 y 3.

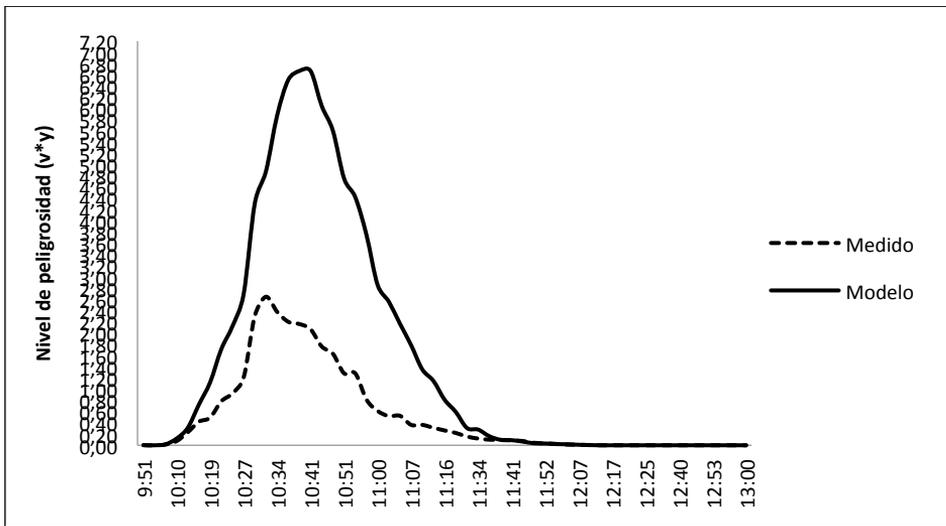


Figura 4. 16 Nivel de peligrosidad Evento 2 Nodo 1 [64]

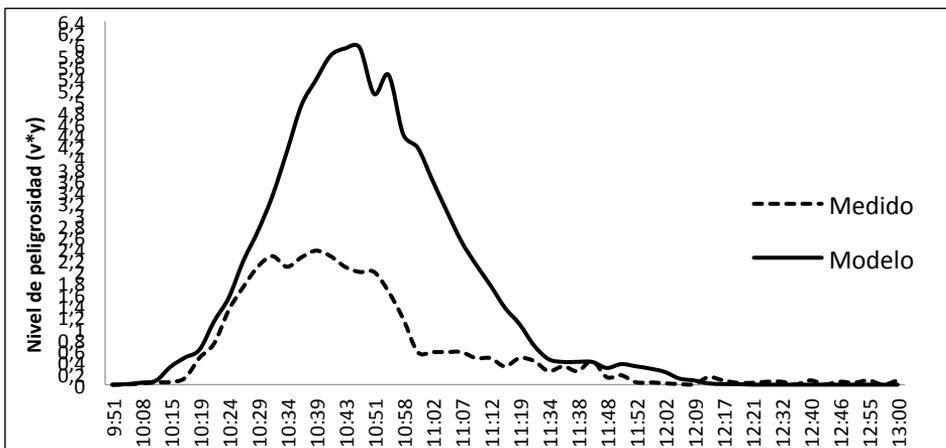


Figura 4. 17 Nivel de peligrosidad Evento 2 Nodo 3 [64]

Las Figuras 4.16 y 4.17 demuestran los efectos de no considerar la posibilidad de desbordamiento en las secciones transversales por el modelo desarrollado; sin embargo, de acuerdo con los resultados obtenidos esto no afecta la efectividad de la alerta sobre el nivel de peligrosidad para peatones y conductores.

Las figuras 4.18 y 4.19 muestran un acercamiento en el tiempo de inicio y fin del nivel de peligrosidad durante el evento 2. Una línea de trazos representa la línea de peligrosidad fijada a un valor de $0,22 \text{ m}^2/\text{s}$ de acuerdo al criterio de peligrosidad seleccionado. Valores por encima de la línea significa que ese instante de tiempo el punto de observación medido es peligroso y valores por debajo de la línea ya no es peligroso. Para el nodo 1, tanto los valores obtenidos por el modelo propuesto como los valores medidos indicaron que la corriente se volvió peligrosa a las 10:15, tal como lo muestran los marcadores en la figura 4.18. Asimismo, la corriente dejó de ser peligrosa para el modelo a las 11:26 a.m., mientras que para los datos medidos a las 11:19 a.m., una diferencia de 7 minutos.

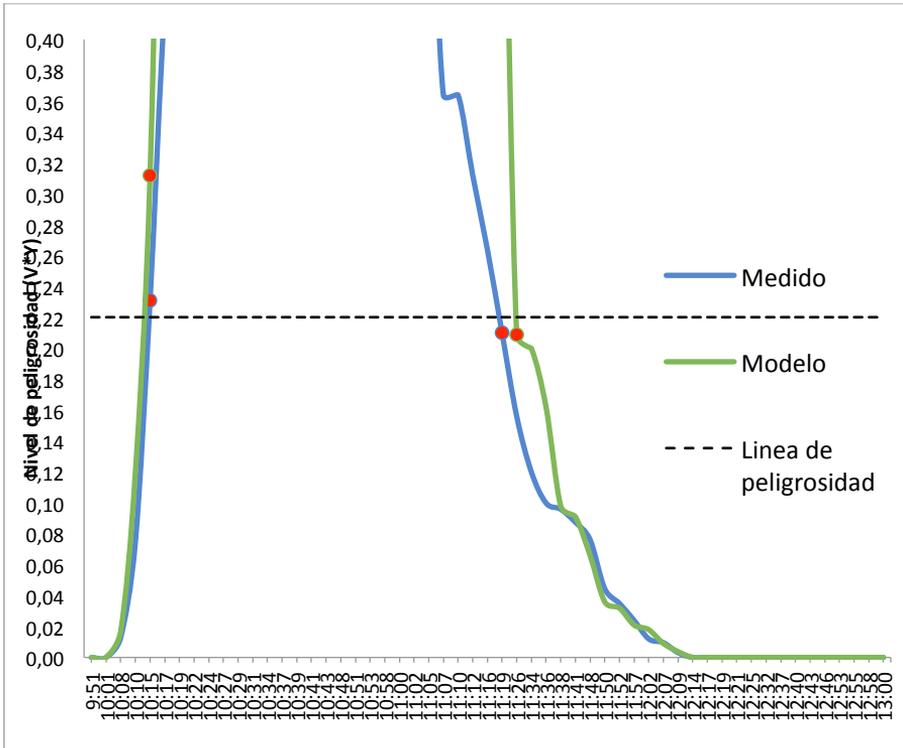


Figura 4. 18 Acercamiento nivel de peligrosidad Evento 2 Nodo 1

Para el nodo 3, los marcadores de la figura 4.19 señalan que la corriente se volvió peligrosa para el modelo propuesto a las 10:15 a.m., 4 minutos antes de los valores medidos. La corriente en este nodo dejó de ser peligrosa a la 11:48 para los valores medidos, mientras que para el modelo propuesto dejó de serlo a las 11:52 a.m, una diferencia de 4 minutos.

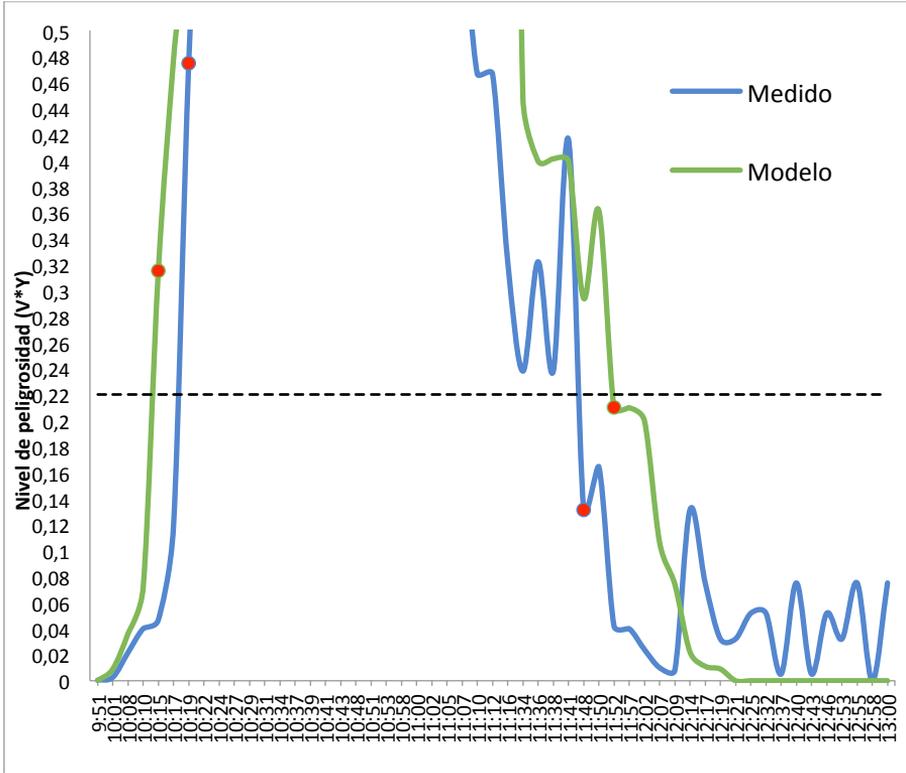


Figura 4. 19 Acercamiento nivel de peligrosidad Evento 2 Nodo 3

De acuerdo a las figuras anteriores se puede observar que para el nodo 1 el modelo propuesto emitiría una alerta de peligrosidad al mismo tiempo que los datos medidos y para el nodo 3 se anticiparían por 4 minutos. Esta diferencia se considera despreciable teniendo en cuenta el tiempo de respuesta de conductores para tomar rutas alternas y peatones para tomar una decisión oportuna una vez recibida la alerta.

Es necesario enviar una alerta o visualizar cuando la corriente ha dejado de ser peligrosa y así peatones y conductores pueden cruzar

el arroyo. De acuerdo a los valores obtenidos por el modelo propuesto, el nodo 1 y nodo 3 emitiría una señal de no peligrosidad en un período entre 4-7 minutos después que los datos medidos. Esta pequeña diferencia hace que el sistema propuesto se más restrictivo y permite tener un periodo de seguridad antes de tomar la decisión de cruzar el arroyo.

El modelo hidrológico e hidráulico presentado en esta investigación permite la detección del nivel de riesgo en tiempo real en todas las secciones transversales utilizando solo la información del pluviómetro, el levantamiento topográfico y un sistema de comunicaciones para transmitir y mostrar la advertencia a la comunidad; por lo tanto, los sensores de nivel de agua y velocidad no son necesarios para un punto de observación deseado, solamente para el proceso de calibración. Del mismo modo, este sistema de alerta temprana no requiere datos históricos, lo que lo hace adecuado para cuencas no aforadas. La eliminación del sensor de nivel de agua de la arquitectura de red reduce el consumo de datos y energía del sistema.

Capítulo 5: Conclusiones

Esta tesis doctoral propone un Sistema de Alerta Temprana (SAT) en tiempo real que detecta el nivel de peligrosidad en inundaciones pluviales repentinas en zonas urbanas. Este sistema se presenta como una medida de mitigación de riesgo no estructural para evitar que los peatones y conductores sean arrastrados por las fuertes corrientes cuando intentan cruzar una calle inundada.

Este SAT fue implementado como ejemplo en la ciudad de Barranquilla (Colombia), el cual durante los eventos de lluvia las calles de la ciudad se convierten en inundaciones pluviales repentinas, conocidas como arroyos peligrosos. Se tomó como objeto de estudio el arroyo peligroso conocido como “La 65” que tiene una longitud aproximada de 4.5 km.

Este sistema se desarrolló en fases y se obtuvieron los siguientes resultados

Fase 1: Diseño del modelo hidrológico e hidráulico.

El objetivo del modelo hidrológico-hidráulico es obtener la variación del nivel y velocidad del agua en diferentes puntos del arroyo en tiempo real. Primeramente se determinaron las propiedades físicas de la cuenca tales como tamaño, longitud del cauce principal y sus afluentes. Una vez definido el cauce principal y sus afluentes se realizó levantamiento topográfico detallado de las secciones transversales con una resolución de 50 m. Asimismo, se

determinó el coeficiente de rugosidad teniendo en cuenta el revestimiento de las calles.

Segundo, se realizó el cálculo de la lluvia efectiva y descarga pico basado en el método propuesto por el Soil Conservation Service (SCS). A través de un código desarrollado en lenguaje Python se recibe la medición de la intensidad de lluvia y se transforma en un hidrograma de caudal. Finalmente, este hidrograma de caudal se introduce a un software hidráulico, que contiene la geometría del canal y calcula el nivel y velocidad del agua a lo largo de todas las secciones transversales.

La principal ventaja del modelo desarrollado es que permite calcular el nivel y velocidad del agua en todas las secciones transversales y su variación durante el evento de lluvia en tiempo real. Anteriormente, si se quería brindar información sobre el nivel de peligrosidad en diferentes puntos a lo largo del arroyo era necesario la instalación de instrumentos de medición en cada uno de estos puntos, lo que implica una inversión de alto costo. Sin embargo, el modelo permite enviar información del estado de peligrosidad a lo largo del arroyo con una resolución espacial de 50 m y resolución temporal de 5 minutos utilizando únicamente la información recibida por los pluviómetros.

Fase 2: Calibración y validación del modelo hidrológico-hidráulico.

Para la calibración y validación del modelo se implementó un sistema de monitorización de la intensidad de lluvia y nivel del agua. Se instalaron tres puntos de medición distribuidos a lo largo del arroyo que constan de un pluviómetro, sensor de nivel, un

módulo GPRS para el envío de los datos y un sistema fotovoltaico para el suministro de energía. En el capítulo 4 los datos obtenidos por estos instrumentos se compararon con los arrojados por el modelo hidrológico-hidráulico propuesto demostrando su efectividad.

Debido a que flujo de la corriente en las inundaciones repentinas es turbulento y durante su recorrido puede arrastrar diferentes objetos, para la medición del nivel del agua no se recomienda el uso de sensores sumergibles, como los sensores de presión. Por lo tanto, los sensores ultrasónicos o de radar son más adecuados para aplicaciones de inundación.

Fase 3: Nivel de peligrosidad y tiempo crítico de respuesta.

De acuerdo a los estudios de pérdida estabilidad revisados para peatones y vehículos expuestos a inundaciones, se determinó que las variables que influyen en la pérdida de estabilidad es la acción conjunta de la velocidad y nivel del agua sobre los peatones y vehículos. Se seleccionó el criterio más restrictivo desarrollado por Martínez-Gomariz et al. (2016) que establece que si el producto de la velocidad por el nivel del agua ($v*y$) es igual o superior a $0.22 \text{ m}^2/\text{s}$, en ese instante de tiempo el punto de observación no puede ser cruzado, por lo tanto el sistema emitirá una alerta de peligrosidad

Fase 4: Difusión de las alertas

Una vez se obtienen los valores de velocidad y nivel de agua, se calcula la peligrosidad en cada sección transversal. Cada cinco minutos se recibe un valor de cantidad de lluvia y se realiza el

cálculo de peligrosidad. Estos valores son visualizados a través de una página Web diseñada (www.isatbaq.com.co) y recibir notificaciones a través de twitter y la aplicación móvil telegram.

La figura 5.1 presenta el consolidado del sistema de alerta temprana propuesto.

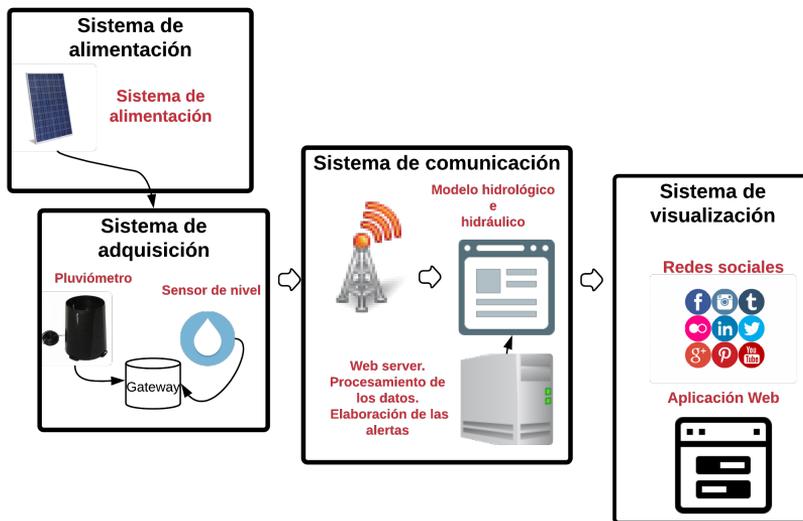


Figura 5. 1Sistema de Alerta Temprana Propuesto

A diferencia de otros modelos que utilizan sensores de medición de nivel y velocidad del agua en cada punto de observación, el sistema de alerta temprana desarrollado en esta tesis optimiza el número de estos recursos. Para el proceso de transformación de lluvia en caudal y luego en velocidad y nivel de agua solo se necesitan los siguientes elementos:

1. Levantamiento topográfico detallado.

En esta tesis se realizó el levantamiento topográfico del canal principal con una resolución de 50 metros. Es preferible que se tenga información de las zonas permeables e impermeables de la cuenca para establecer la capacidad real de infiltración.

2. Pluviómetros

Se utilizaron tres pluviómetros para medir la cantidad de lluvia en la cuenca de estudio. Esta medición es la más importante y para el modelo desarrollado es el único instrumento de medición necesario. Los sensores de nivel y velocidad son importantes dentro del proceso de calibración del modelo, pero este sistema no se necesita un sensor en cada punto de observación.

3. Código para la transformación de lluvia medida a caudal.

El código desarrollado en Python recibe la medición de la cantidad de lluvia y calcula el hidrograma de caudal para cada asociado a cada valor. Estos hidrogramas son acumulados durante la duración de lluvia y se actualiza cada 5 minutos, es decir, con cada nueva medición.

4. Software hidráulico para el cálculo de nivel y velocidad del agua.

Una vez se obtiene el hidrograma de caudal, esta información se introduce a un software hidráulico y calcula para todas las secciones

transversales el nivel y velocidad del agua y su variación en el tiempo. Para esta tesis se utilizó el software libre HEC-RAS.

5. Sistema de difusión de las alertas.

De acuerdo a la revisión realizada es necesario contar con mínimo dos canales para la difusión de las alertas para garantizar que puedan llegar de forma oportuna a la comunidad. En esta tesis se desarrolló una aplicación Web que visualiza la información de peligrosidad durante los eventos de lluvia, pero también envía las alertas a través de redes sociales.

Capítulo 6: Trabajos futuros, colaboraciones y líneas de investigación derivadas, publicaciones.

6.1 Trabajos futuros

6.1.1 Modelación hidráulica en 2D

El modelo desarrollado en la presente tesis doctoral es unidimensional (1D) el cual utilizó la geometría de las secciones transversales y el cálculo de los caudales para estimar los valores de velocidad y nivel del agua. Este modelo unidimensional asume un flujo constante del agua, sin embargo, no en todas las secciones transversales tiene este comportamiento. Como trabajo futuro se propone el análisis bidimensional del flujo del agua, teniendo en cuenta información de definición de zonas inundables, evaluación de zonas de riesgo, y delimitación de vías de intenso desagüe. Asimismo, se introducirá la información de los tres pluviómetros, geometría de las intersecciones de las calles y subdivisión de la cuenca en sub-cuencas. Lo anterior conlleva un gasto computacional mayor y requiere sistemas de cómputo con altas capacidades de procesamiento.

6.1.2 Sistema de comunicaciones de respaldo.

Durante los eventos de lluvia es necesario garantizar el envío de los datos medidos al centro de procesamiento y posteriormente las alertas a los usuarios. Sin embargo, no todos los sistemas de alertas tempranas cuentan con sistema de respaldo en la comunicación para el envío de la información en caso de fallos. Es necesario que el sistema de comunicación esté configurado con mínimo dos protocolos distintos uno primario y otro secundario para que en caso de fallos en el primario, el secundario pueda enviar la información evitando retrasos en las alertas.

Actualmente, el SAT propuesto utiliza módulos GPRS para el envío de la información y no tiene un sistema de comunicaciones de respaldo. Por lo tanto, se propone configurar un protocolo de comunicaciones adicional para disminuir el riesgo de pérdida de la información por fallos en la red de comunicaciones.

6.2 Colaboraciones

En el marco de la tesis doctoral se desarrolló una pasantía investigativa en la Universidad de Puerto Rico, Recinto Universitario de Mayagüez (UPRM) en el programa de Doctorado de Ingeniería Eléctrica. La UPRM cuenta con una red de radares meteorológicos instalados en el área oeste de Puerto Rico para la detección de fenómenos atmosféricos que no llegan a ser detectados por el radar NexRAD del Servicio Nacional de Meteorología de Estados Unidos debido a los efectos de la curvatura de la tierra.

A través de esta estancia se recibió capacitación en el uso de radares Doppler y polarimétricos que operan de forma colaborativa capaz de enfocarse en un evento desde múltiples ángulos, para estimar con precisión los niveles de lluvia cerca del suelo y detectar precursores de futuras tormentas, todo en respuesta a las cambiantes necesidades del usuario. En sistemas de alertas tempranas para inundaciones repentinas, los radares meteorológicos se constituyen como elementos complementarios de gran importancia porque tienen gran cobertura y permiten traducir la información de reflectividad en cantidad de lluvia. Sin embargo, tienen mayores requisitos de instalación y son más costosos.

De esta pasantía se generó un trabajo colaborativo para realizar un análisis comparativo de los datos obtenidos por el radar NexRAD y el radar a bordo de la misión de Medición Global de Precipitaciones (GPM) durante eventos atmosféricos que causan desastres como lo fue el huracán Irma. Las figuras 6.1 y 6.2 evidencian la visita a uno de los radares de propiedad de la UPRM en el área oeste de Puerto Rico.



Figura 6.1 Visita a instalaciones del radar Doppler-Polarimétrico de la UPRM



Figura 6. 2 Torre y cuarto de control del radar UPRM

Durante esta estancia también se participó como ponente internacional en el seminario técnico doctoral en el programa de doctorado en Ingeniería Eléctrica donde se compartieron los resultados obtenidos en esta tesis doctoral. Las imágenes 6.3 y 6.4 evidencian la participación.



Figura 6. 3 Participación ponente internacional seminario técnico



Figura 6. 4 Certificado de participación seminario técnico

6.3 Líneas de investigación derivadas de la tesis

De la presente tesis doctoral se derivaron tres proyectos que contribuyen al desarrollo de trabajos futuros, dos tesis de maestría en Ingeniería y un proyecto de fin de carrera del programa de Ingeniería Electrónica en la Universidad de la Costa (Barranquilla, Colombia)

1. Tesis de maestría: Modelo de Evaluación de Condiciones Atmosféricas para la Predicción de Lluvias en la Ciudad de Barranquilla

Estudiante: Ing. Elkin Dubán Ramírez Cerpa
M.Sc. Melisa Acosta-Coll

Director:

Este trabajo desarrolló un modelo de evaluación de las condiciones atmosféricas en tiempo real para predecir a corto plazo las lluvias en la ciudad de Barranquilla, con el fin que la comunidad pueda tomar decisiones oportunas. El modelo de predicción identifica un patrón de lluvias en la ciudad utilizando datos históricos de precipitación y condiciones atmosféricas en los últimos 5 años. A través del uso de técnicas, herramientas y metodologías estadísticas y/o estocásticas se establece una métrica de probabilidad o cantidad de lluvia, para indicar a la comunidad la presencia de precipitación. Este modelo permite evaluar en tiempo real las condiciones atmosféricas en un punto de la ciudad para que se conozca si lloverá pronto o no.

2. Tesis de maestría: Evaluación del Rendimiento del Protocolo LoRaWAN sobre una Plataforma de Monitoreo Remoto y Visualización de Variables Hidrometeorológicas para Sistemas de Alertas Tempranas.

Estudiante: Ing. Daniel De la Rosa Morón Director: M.Sc.
Melisa Acosta-Coll

Este proyecto optimizar el sistema de comunicaciones y gestión de la información de las mediciones hidrometeorológicas en tiempo real de un sistema de alerta tempranas para inundaciones pluviales repentinas, de manera que los datos medidos sean fiables, seguros, sin retardos y la información sea visualizada de forma interactiva e intuitiva. Para lograr la optimización del sistema de comunicaciones se implementará el estándar de comunicación LoRaWAN (Low Power Wide Area Network) comparado con los módulos GPRS. El estándar LoRaWAN se caracteriza por ser de bajo costo y consumo energético, largo alcance de comunicación y baja frecuencia de transmisión; permitiendo la interconexión de diferentes sensores sin la necesidad de instalaciones locales complejas. LoRaWAN garantiza el envío de los paquetes de comunicación en condiciones atmosféricas adversas ya que no depende de un operador privado que administre la red.

3. Proyecto de fin de carrera: Implementación de una red de pluviómetros utilizando el protocolo LoRaWan para medición de precipitaciones

Estudiante: Ing. Lilia Rosa Ortega González Director:
M.Sc. Melisa Acosta-Coll

En este proyecto se busca implementar una red de pluviómetros utilizando el protocolo LoRaWan para medición de precipitaciones y proveer las medidas hidrometeorológicas de forma oportuna. Para implementar el sistema se hace uso de la tecnología exclusiva para el desarrollo de IoT denominada Low Power Wide Area Networks (LPWA), la cual ofrece una solución que combina hardware de bajo costo, excelente cobertura y requisitos de energía extremadamente bajos. Para la integración de los pluviómetros se utiliza la plataforma de desarrollo RE-Mote de Zolertia y una placa hardware inalámbrica compatible con los protocolos y estándares mencionados. La aplicación del sistema se pretende desarrollar en Contiki OS, un sistema operativo desarrollado para el Internet de las Cosas.

6.4 Publicaciones realizadas

Título: Early warning system for detection of urban pluvial flooding hazard levels in an ungauged basin

Autores: Acosta-Coll, Melisa; Ballester-Merelo, Francisco J; Martínez-Peiró, Marcos.

Revista: Natural Hazards. June 2018, Volume 92, Issue 2, pp 1237–1265. DOI: 10.1007/s11069-018-3249-4.

Factor de Impacto: 1.901.

Título: Real-Time Early Warning System Design for Pluvial Flash Floods—A Review.

Autores: Acosta-Coll, Melisa; Ballester-Merelo, Francisco J; Martínez-Peiró, Marcos; De La Hoz-Franco, Emiro.

Revista: Sensors. 2018, Volume 18 (7), 2255. DOI: 10.3390/s18072255.

Factor de Impacto: 2.475

REFERENCIAS

- [1] J. Sunkpho and C. Ootamakorn, “Real-time flood monitoring and warning system,” *Songklanakarín J. Sci. Technol.*, vol. 33, no. 2, pp. 227–235, 2011.
- [2] The University Corporation for Atmospheric Research., *Flash flood early warning system reference guide*. 2010.
- [3] A. Benzerra, M. Cherrared, B. Chocat, F. Cherqui, and T. Zekiouk, “Decision support for sustainable urban drainage system management: A case study of Jijel, Algeria,” *J. Environ. Manage.*, vol. 101, pp. 46–53, 2012.
- [4] J. De Castro, G. Salistre, Y.-C. Byun, and B. Gerardo, “Flash Flood Prediction Model based on Multiple Regression Analysis for Decision Support System,” in *World Congress on Engineering and Computer Science*, 2013.
- [5] V. T. Chow, D. Maidment, and L. Mays, *Hidrología Aplicada*. McGraw Hill, 1994.
- [6] F. Aparicio, *Fundamentos de hidrología de superficie*, Primera. México D.F: LIMUSA, 1989.
- [7] W. Chereque, *Hidrología para estudiantes de ingeniería civil*. Lima: CONCYTEC., 1992.
- [8] A. E. de M. AEMET, “Manual de uso de términos meteorológicos.” Ministerio de Agricultura, Alimentación y Medio Ambiente, Madrid, pp. 21–22, 2015.
- [9] V. T. Chow, *Hidráulica de Canales Abiertos*. McGraw Hill, 1994.
- [10] M. Gomez, *Curso de hidrología urbana*, 7th ed. Barcelona: Universitat Politècnica de Catalunya, 2008.
- [11] M. Potter and D. Wiggert, *Mecánica de Fluidos*, Tercera. Thompson Editores, 2002.
- [12] A. Saint-Venant Barré de, *Theoretical and Practical Studies of Stream flow*. Paris, 1848.
- [13] S. C. S. SCS, *National Engineering Handbook, section 4*. Washington DC: U.S Dept of Agriculture. Government Printing Office, 1972.
- [14] U. D. and F. C. D. UDFCD, *Urban Storm Drainage Criteria Manual: Volume 1 Management, Hydrology, and Hydraulics*, 2016th ed. 1969.

- [15] M. Gomez, “Hidrología Urbana.” *Dinamica fluvial i ingenyeria hidrologica FLUMEN*, Barcelona, pp. 147–174, 2007.
- [16] A. Rooseboom, M. Basson, C. Loots, J. Wiggett, and J. Bosman, *Manual on road drainage*, 2nd ed. Johannesburg: National Transport Commission, 1986.
- [17] C. C. R. F. C. D. CCRFCD, “Hydrologic criteria and drainage design manual.” Las Vegas, 1999.
- [18] L. Nanía, “Metodología numérica experimental para el análisis del riesgo asociado a la escorrentía pluvial en una red de calles,” *Universitat Politècnica de Catalunya*, 1999.
- [19] E. Martínez-Gomariz, M. Gómez, and B. Russo, “Experimental study of the stability of pedestrians exposed to urban pluvial flooding,” *Nat. Hazards*, vol. 82, no. 2, pp. 1259–1278, 2016.
- [20] S. R. Abt, R. J. Wittier, A. Taylor, and D. J. Love, “HUMAN STABILITY IN A HIGH FLOOD HAZARD ZONE1,” *J. Am. Water Resour. Assoc.*, 1989.
- [21] J. Témez, “Control del desarrollo urbano en las zonas inundables. Colegio de Ingenieros de Caminos, Canales y Puertos.” Colegio de Ingenieros de Caminos, Canales y Puertos, Madrid, 1992.
- [22] B. Russo, “Design of surface drainage systems according to hazard criteria related to flooding of urban areas,” *Universitat Politècnica de Catalunya*, 2009.
- [23] E. Martínez-Gomariz, M. Gómez, B. Russo, and S. Djordjević, “Stability criteria for flooded vehicles: A state-of-the-art review,” *J. Flood Risk Manag.*, 2016.
- [24] E. Martínez-Gomariz, M. Gómez, B. Russo, and S. Djordjević, “A new experiments-based methodology to define the stability threshold for any vehicle exposed to flooding,” *Urban Water J.*, vol. 14, no. 9, pp. 930–939, 2017.
- [25] World Meteorological Organization, “Guidelines on Early Warning Systems and Application of Nowcasting and Warning Operations,” *Pws-21*, no. 1559, p. 25, 2010.
- [26] National Weather Service, “Flood Safety Awareness Week: Flood Hazards,” 2017. [Online]. Available: <http://www.weather.gov/aly/fldsafetyWednesday>. [Accessed: 07-Jul-2017].
- [27] M. Azam., H. S. Kin, and S. J. Maeng, *Development of flood alert application in Mushim stream watershed Korea*, vol. 21. 2017.

- [28] J. D. Creutin, M. Borga, E. Grunfest, C. Lutoff, D. Zocatelli, and I. Ruin, “A space and time framework for analyzing human anticipation of flash floods,” *J. Hydrol.*, vol. 482, pp. 14–24, 2013.
- [29] World Meteorological Organization, “Global approach to address flash floods,” 2017. [Online]. Available: <http://www.hrc-lab.org/publicbenefit/downloads/wmo-flashflood.pdf>. [Accessed: 01-Aug-2017].
- [30] T. Einfalt, F. Hatzfeld, A. Wagner, J. Seltmann, D. Castro, and S. Frerichs, “URBAS: forecasting and management of flash floods in urban areas,” *Urban Water J.*, vol. 6, no. 5, pp. 369–374, 2009.
- [31] T. Tingsanchali, “Urban flood disaster management,” *Procedia Eng.*, vol. 32, pp. 25–37, 2012.
- [32] The Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC), *Climate Change 2007: Impacts, Adaptation and Vulnerability*. Cambridge University Press, 2007.
- [33] E. Gencer, “Natural Disasters, Urban Vulnerability, and Risk Management: A Theoretical Overview,” in *The Interplay Between Urban Development, Vulnerability, and Risk Management, Mediterranean Studies*, 2013.
- [34] A. Cama-Pinto, G. Piñeres-Espitia, R. Zamora-Musa, M. Acosta-Coll, J. Caicedo-Ortiz, and J. Sepúlveda-Ojeda, “Design of a wireless sensor network for monitoring of flash floods in the city of Barranquilla, Colombia,” *Rev. Chil. INGENIARE*, vol. 24, no. 4, pp. 581–599, 2016.
- [35] The world Bank Disaster Management facility, *Building Safer Cities: The Future of Disaster Risk*. Washington DC, 2003.
- [36] S. Jonkman and I. Kelman, “An analysis of the causes and circumstances of flood disaster deaths,” *Disasters*, vol. 1, pp. 75–97, 2005.
- [37] International Strategy for Disaster Reduction (ISDR), “UNISDR Terminology on Disaster Risk Reduction,” 2009. [Online]. Available: <https://www.unisdr.org/we/inform/publications/657>. [Accessed: 24-Jul-2017].
- [38] United Nations Environment Programme, V. Grasso, A. Singh, and J. Pathak, “Early Warning Systems A State of the Art Analysis and Future Directions,” Nairobi, 2012.
- [39] L. Bouwer, E. Papyrakis, J. Poussin, C. Pfurtscheller, and A.

Thieken, “The costing of measures for natural hazard mitigation in Europe,” *Nat. Hazards Rev.*, vol. 15, no. 4, 2014.

[40] International Strategy for Disaster Reduction (ISDR) and G. C. for D. Reduction, “Developing Early Warning Systems: A Checklist,” *Third Int. Conf. Early Warn.*, no. March, pp. 1–13, 2006.

[41] United Nations Office for Disaster Risk Reduction (UNISDR), *Living with Risk A global review of disaster reduction initiatives*, 2004th ed. New York and Ginebra: United Nations publications, 2004.

[42] UNGRD, “Guía metodológica para la elaboración de planes de departamentales para la gestión del riesgo. Programa de Naciones Unidas para el Desarrollo Colombia-UNGRD,” *COL/72959 PNUD-UNGRD*, 2012. [Online]. Available: <http://repositorio.gestiondelriesgo.gov.co/handle/20.500.11762/20871>. [Accessed: 22-Jul-2017].

[43] B. Balis *et al.*, “The Urban Flood Common Information Space for Early Warning Systems,” in *International Conference on Computational Science, ICCS 2011*, 2011, pp. 96–105.

[44] V. V. Krzhizhanovskaya *et al.*, “Flood early warning system: Design, implementation and computational modules,” *Procedia Comput. Sci.*, vol. 4, pp. 106–115, 2011.

[45] International Strategy for Disaster Reduction (ISDR), “Emerging Challenges for Early Warning Systems in context of Climate Change and Urbanization,” 2010. [Online]. Available: http://www.preventionweb.net/files/15689_ewsincontextofccandurbanization.pdf. [Accessed: 09-Aug-2017].

[46] E. J. Plate, “Early warning and flood forecasting for large rivers with the lower Mekong as example,” *J. Hydro-Environment Res.*, vol. 1, no. 2, pp. 80–94, 2007.

[47] M. Ancona *et al.*, “On the design of an intelligent sensor network for flash flood monitoring, diagnosis and management in urban areas position paper,” *Procedia Comput. Sci.*, vol. 32, pp. 941–946, 2014.

[48] M. Fallon, H. Johannsson, J. Brookshire, S. Teller, and J. Leonard, “Sensor Fusion for Flexible Human-Portable Building-Scale Mapping,” in *IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS)*, 2012, pp. 4405–4412.

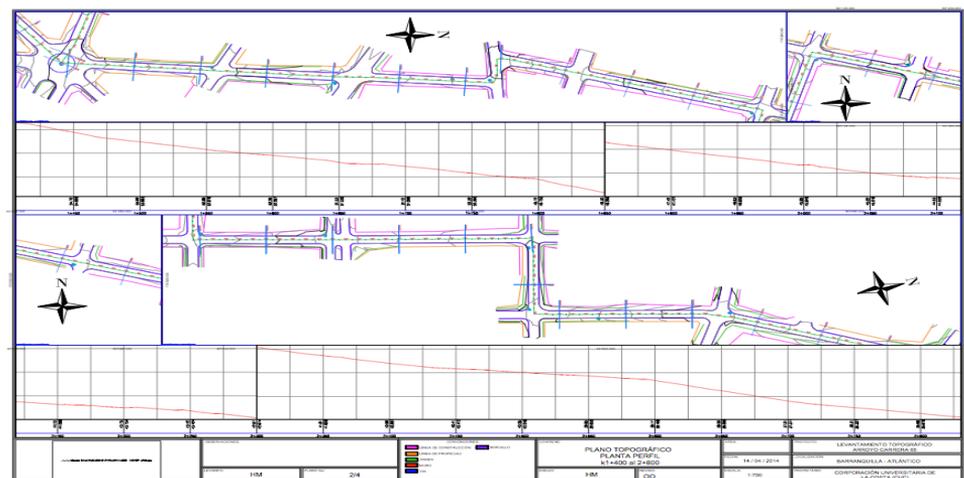
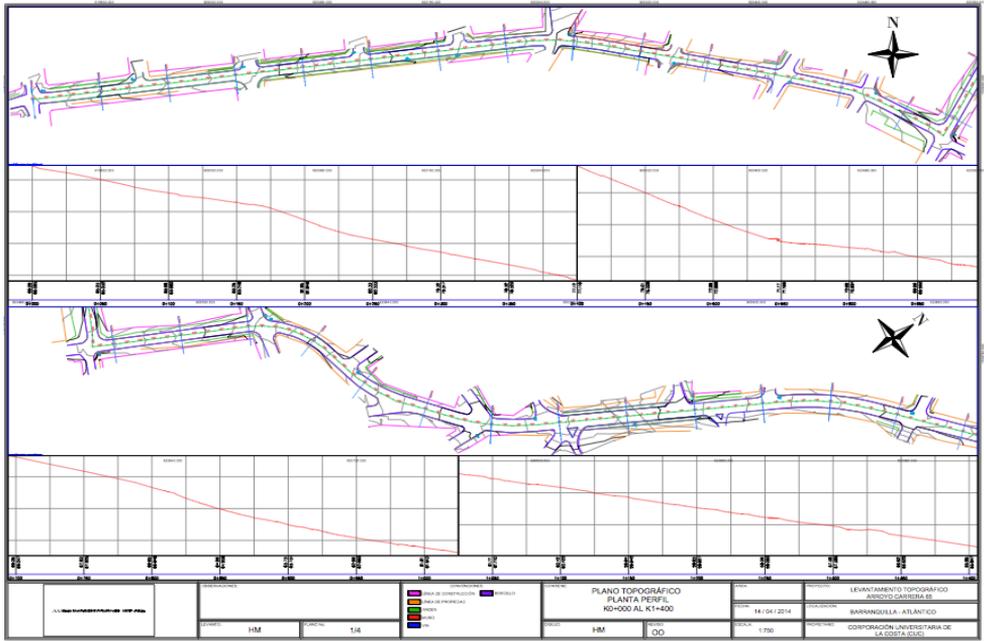
[49] N. Chang and D.-H. Guo, “Urban flash flood monitoring, mapping and forecasting via a tailored sensor network system,”

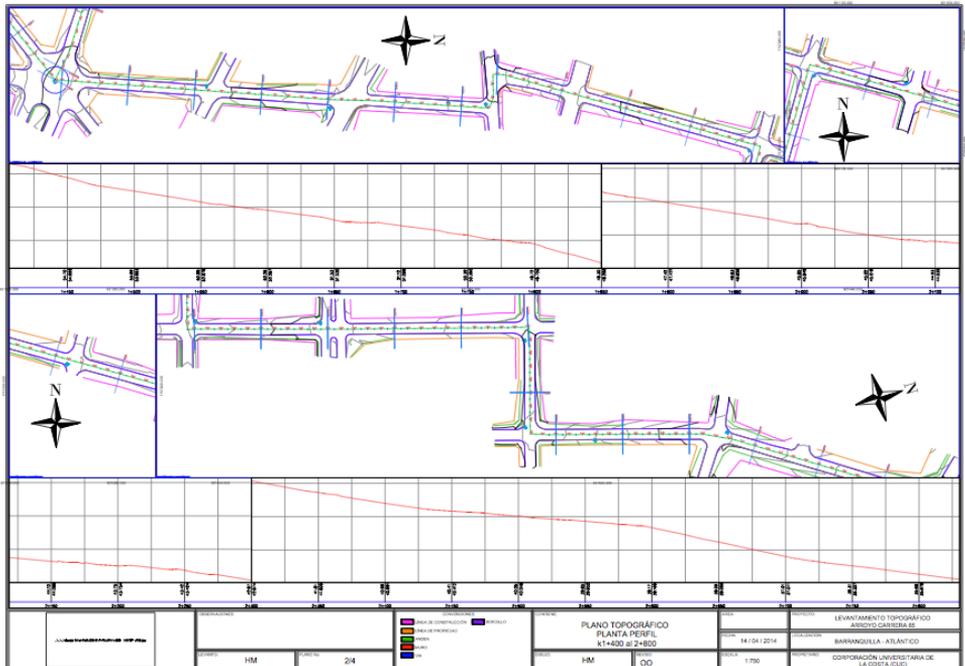
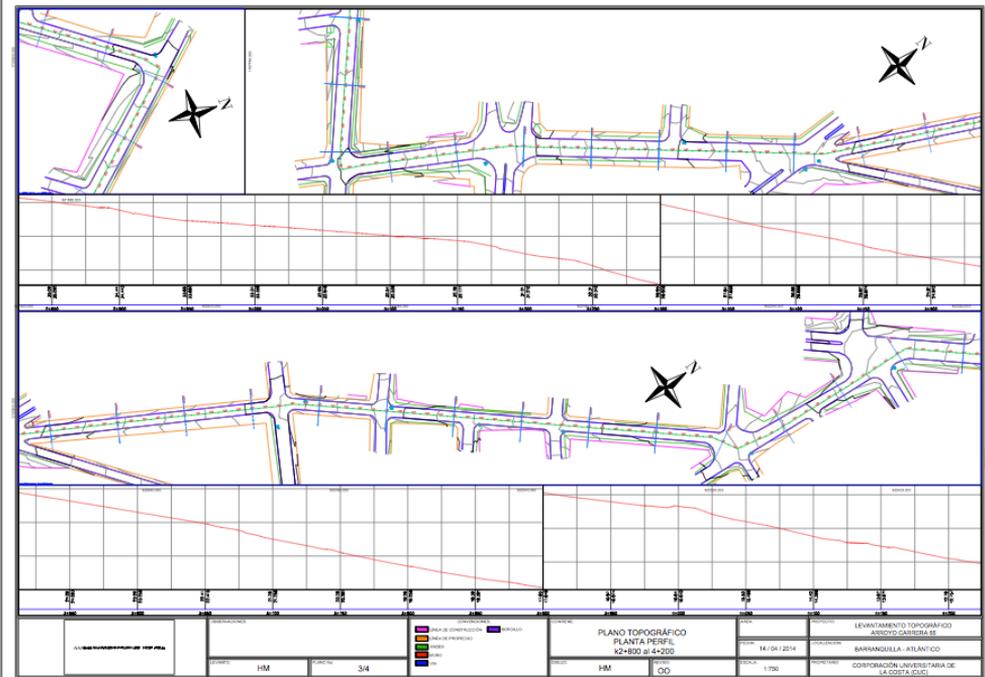
- 2006 *IEEE Int. Conf. Networking, Sens. Control*, pp. 757–761, 2006.
- [50] F. C. C. Garcia, A. E. Retamar, and J. C. Javier, “A real time urban flood monitoring system for metro Manila,” *IEEE Reg. 10 Annu. Int. Conf. Proceedings/TENCON*, vol. 2016–Janua, pp. 3–7, 2016.
- [51] Y. Chonbodeechalermroong and S. Chuenchooklin, “Flash flood warning system in risky area,” *ECTI-CON 2011 - 8th Electr. Eng. Electron. Comput. Telecommun. Inf. Technol. Assoc. Thail. - Conf. 2011*, pp. 133–136, 2011.
- [52] M. Acosta-Coll, “Sistemas de Alerta Temprana (S.A.T) para la Reducción del Riesgo de Inundaciones Súbitas y Fenómenos Atmosféricos en el Área Metropolitana de Barranquilla,” *Sci. Tech.*, vol. 18, no. 2, pp. 303–308, 2013.
- [53] G. Piñeres-Espitia and A. Mejía-Neira, “Plataformas tecnológicas aplicadas al monitoreo climático,” *Prospectiva*, vol. 11, no. 2, pp. 78–87, 2013.
- [54] Libelium, “Libelium. 2015. Agriculture 2.0. Technical Guide. Date of visit: May 25, 2015,” 2015. .
- [55] E. Murcia, *Sistemas de Alertas Tempranas. Control de la accidentalidad generada por los arroyos*. Barranquilla: EDUCOSTA, 2010.
- [56] P. de la N. U. para el D. C. PNUD, Unidad Nacional para la Gestión del Riesgo, *Proyecto Gestión Integral del Riesgo y Adaptación al Cambio Climático Caribe PNUD-UNGRD, “Plan Departamental de Gestión del Riesgo Atlántico*. PANAMERICANA, 2012.
- [57] M. Acosta-Coll, F. Ballester-Merelo, and M. Martínez-Peiró, “Early warning system for detection of urban pluvial flooding hazard levels in an ungauged basin,” *Nat. Hazards*, 2018.
- [58] J. G. Caicedo-Ortiz, M. A. Acosta-Coll, and A. Cama-Pinto, “Modelo de despliegue de una WSN para la medición de las variables climáticas que causan fuertes precipitaciones,” *Prospectiva*, pp. 106–115, 2015.
- [59] A. Cama-Pinto, G. Piñeres-Espitia, R. Zamora-Musa, M. Acosta-Coll, J. Caicedo-Ortiz, and J. Sepúlveda-Ojeda, “Design of a wireless sensor network for monitoring of flash floods in the city of Barranquilla, Colombia,” *Ingeniare*, vol. 24, no. 4, 2016.
- [60] C. Saad, B. ; Mostafa, E. A. Cheikh, and H. ; Abderrahmane, “Comparative Performance Analysis of Wireless Communication

- Protocols for Intelligent Sensors and Their Applications,” *Int. J. Adv. Comput. Sci. Appl.*, vol. 5, no. 4, 2014.
- [61] A. Breña and M. Jacobo, *Principios y fundamentos de la hidrología superficial*. Ciudad de México: Universidad Autónoma Metropolitana, 2006.
- [62] N. R. C. S. NRCS, *National Engineering Handbook. Part 630: Hydrology, chapter 7: Hydrologic Soil Groups*. 2009.
- [63] J. Arrieta and Y. Fernandez, “Estimación de los caudales del arroyo la segunda brigada II para diferentes períodos de retorno aplicando las herramientas computacionales EPA-SWMM y HEC-RAS,” Universidad de la Costa, 2015.
- [64] M. Acosta-Coll, F. Ballester-Merelo, and M. Martinez-Peiró, “Early warning system for detection of urban pluvial flooding hazard levels in an ungauged basin,” *Nat. Hazards*, vol. 92, no. 2, 2018.
- [65] P. Quevauiller and D. Innocenti, “When Science Meets Policy: Enhancing Governance and Management of Disaster Risks,” in *Hydrometeorological Hazards: Interfacing Science and Policy*, L. John Wiley & Sons, Ed. 2014.

ANEXOS

A. Levantamiento de topografía





B. Código python.

```
#!/usr/bin/python
# -*- coding: iso-8859-15 -*-
import os, sys
import math
from StringIO import StringIO
import openpyxl
import numpy as np
import xlrd
#import matplotlib.pyplot as plt
import xlwt
import datetime
import time

from time import gmtime, strftime
archivoxml = open('archivosoap1.xml', 'r')

linea = archivoxml.readline()
while linea != "":
    if linea.find('measurevalue') != -1:
        a = linea
        linea = ""
    else:
        linea = archivoxml.readline()
archivoxml.close()
b = float(a[36:-18]) #valor medido en mm
pfile = openpyxl.load_workbook(filename='tiempo.xlsx')
worksheets = pfile.get_sheet_by_name('Hoja1')
matriz = []
for row in worksheets.iter_rows():
    for k in row:
        matriz.append(k.internal_value)
    t = np.transpose(matriz)
P = float(b)
Pin = P * 0.0393
NC = float(98)
S = float((1000 / NC)-10)
Roff = (((Pin-0.2*S) ** 2) / (Pin + 0.8*S))/ 0.0393
A = 3.1*0.99
L = 4560
s1 = 0.018
tc = float((1.7)*(L**0.8)*((2540-22.86*NC)**0.7)/ (14104*(NC**0.7)*(S**0.5))#tiempo de
concentracion formula SCS hr
tp = float(0.6*tc)
tpmin = tp * 60
qp = 0.75 * (Roff/ tp)
qpa = 0.208*((A*Roff)/tp)
ttp = t / tp
ttpr = np.around(ttp, decimals=2)
```

```

hidrograma = openpyxl.load_workbook(filename='hidrograma_scs_completo.xlsx')
h = hidrograma.get_sheet_by_name('Hoja1')
matriz2 = []
for row2 in h.iter_rows():
    for k2 in row2:
        matriz2.append(k2.internal_value)
        HSCS = np.resize(matriz2, (501, 2))
vector = [range(1) for i in range(201)]
Q = [range(1) for i in range(201)]

for i in range(len(ttpr)):
    for i1 in range(len(HSCS)):
        if ttpr[i] == HSCS[i1][0]:
            vector[i1] = [HSCS[i1][1]]
            vectorfinal = np.array(vector, dtype=float)
            #Q1 = vectorfinal * qp
            Q1 = vectorfinal * qpa
            Q = np.around(Q1, decimals=2)
style0 = xlwt.easyxf('font:name Times New Roman, colour red, bold on')
style1 = xlwt.easyxf('num_format_str=MM/DD/YYYY')
wb = xlwt.Workbook()
ws = wb.add_sheet('Hoja1', cell_overwrite_ok=True)

for i in range(len(Q)):
    for k3 in Q[i]:
        #ws.write(0,0, datetime.datetime.now(), style1)
        ws.write(0, 0, '01/01/2015')
        z = datetime.datetime(year=2015, month=01, day=01, hour=00, minute=00)
        hour1 = z + datetime.timedelta(seconds=60 * i)
        hora = str(hour1.hour).zfill(2) + ':' + str(hour1.minute).zfill(2)
        ws.write(i, 2, hora)
        ws.write(i, 4, k3)
wb.save('punto1-3.8.xls')
X = []
for i in range(len(Q)):
    for k3 in Q[i]:
        z = datetime.datetime(year=2015, month=01, day=01, hour=00, minute=00)
        hour1 = z + datetime.timedelta(seconds=60 * i)
        hora = str(hour1.hour).zfill(2) + ':' + str(hour1.minute).zfill(2)

```

C. Artículo 1

Review

Real-Time Early Warning System Design for Pluvial Flash Floods—A Review

Melisa Acosta-Coll^{1,2,*}, **Francisco Ballester-Merelo**¹, **Marcos Martínez-Peiró**¹ and **Emiro De la Hoz-Franco**²

¹ Department of Electronic Engineering, Universitat Politècnica de València, 46022 València, Spain; fballest@eln.upv.es (F.B.-M.); mpeiro@eln.upv.es (M.M.-P.)

² Department of Computer Sciences and Electronic, Universidad de la Costa, 080020 Barranquilla, Colombia; edelahoz@cuc.edu.co

* Correspondence: macosta10@cuc.edu.co; Tel.: +57-304-337-8811

Received: 22 May 2018; Accepted 10 July 2018; Published: date

Abstract: Pluvial flash floods in urban areas are becoming increasingly frequent due to climate change and human actions, negatively impacting the life, work, production and infrastructure of a population. Pluvial flooding occurs when intense rainfall overflows the limits of urban drainage and water accumulation causes hazardous flash floods. Although flash floods are hard to predict given their rapid formation, Early Warning Systems (EWS) are used to minimize casualties. We performed a systematic review to define the basic structure of an EWS for rain flash floods. The structure of the review is as follows: first, Section 2 describes the most important factors that affect the intensity of pluvial flash floods during rainfall events. Section 3 defines the key elements and actors involved in an effective EWS. Section 4 reviews different EWS architectures for pluvial flash floods implemented worldwide. It was identified that the reviewed projects did not follow guidelines to design early warning systems, neglecting important aspects that must be taken into account in their implementation. Therefore, this manuscript proposes a basic structure for an effective EWS for pluvial flash floods that guarantees the forecasting process and alerts dissemination during rainfall events.

Keywords: pluvial flooding; urban drainage; flash floods; early warning system; flood risk assessment; real-time

Flooding is considered as one of the major threats to human civilization and is directly attributed to heavy precipitation leading to loss of life, infrastructure damage, as well as huge economic losses [1,2]. Climate change, intense natural resource exploitation and inappropriate land use have altered the hydrological response of catchments. These factors increase the frequency and magnitude of floods. Similarly, a combination of an exposed, vulnerable and ill-prepared population may exacerbate such situations and even generate additional risks. The insufficient capacity of public authorities and rescue services to act diligently in these situations increases later mentioned risks [3–5].

Cities with high population density present a higher disaster risk. They are expected to experience the effects of climate change with the increment of intensity and frequency of harmful events such as flash floods [6]. Vulnerability to disasters in urban areas is a combination of interrelated physical, sociocultural, economic, and institutional conditions [7].

Different types of floods can affect urban areas and some of them may be more applicable to some regions than others. These floods are mainly classified into four types: coastal, fluvial, pluvial and flash floods.

Coastal flooding results from a combination of extreme climatic phenomena. The sea level exceeds the elevation of the land or of a natural or human barrier; water flows and floods the land behind it [5,8]. When the coasts are constantly exposed to large waves, the natural and human-engineered barriers break down, increasing the risk of flooding. Also, this flood can be caused by earthquakes, submarine volcanic eruptions, subsidence and coastal erosion [9].

The flooding that affects the vast majority of the world's regions is fluvial flooding or river flooding. This type of flood occurs when the rivers overflow or burst their banks due to excessive rainfall over an extended period of time and spill onto the floodplain [10,11]. It can also be caused by rapid snowmelt and ice jams and occurs in any size channel from small streams to huge rivers.

Pluvial flooding or surface water flooding is a problem in many cities and occurs when, during high intensity rainfall, the sewage and drainage system becomes overwhelmed and excess water cannot be absorbed into the soil [12]. This problem is enhanced in cities with insufficient or non-existent sewer systems. Although fluvial floods are more devastating than pluvial flooding, they do not occur that often. Pluvial floods come with less damage but, the frequency is higher and the cumulative damage over the years can be just as high as with fluvial flooding events [13,14].

Of all the negative impact generated by floods, none is as harmful as flash floods (based upon the ratio of fatalities to people affected), which cause millions of dollars in property damage every year [15]. The World Meteorological Organization (WMO) defines flash floods as “*a flood of short duration with a relatively high peak discharge*” [16]. The American Meteorological Society states: “*a flash is a flood that rises and falls quite rapidly with little or no advance warning, usually as the result of intense rainfall over a relatively small*

area” [6]. The U.S. National Weather Service describes them as: “*a rapid and extreme flow of high water into a normally dry area, or a rapid water level rise in a stream or creek above a predetermined flood level, beginning within six hours of the causative event (e.g., intense rainfall, dam failure, ice jam)*” [7]. These floods are typically caused by coastal, fluvial and pluvial systems and convective thunderstorms as well as extreme events such as hurricanes, severe thunderstorm, tropical storms or tsunami [15]. Dam break, a levee break and snow melting in rivers during winter and spring months can result in flash floods.

As reported by The World Bank, in 2008 half of the world’s population lived in urban areas but in 2030 this number will increase to 60% and 70% in 2050 [9]. This accelerated urbanization compounds flood risk since, in most cases, it is done in an unplanned way [17]. Therefore, urban flood disaster prevention and mitigation are a recognized international priority that includes assessing flood hazards and risks and preparing effective flood mitigation measures [16,18].

Although, historically, the most reported flood events are fluvial followed by pluvial and sea water, pluvial floods have increased in cities and have the highest proportion of occurrence since 2000 compared to other types of floods in the same period [19]. Figure 1 shows a preliminary assessment of pluvial flood impacts for 571 cities across the continent of Europe developed by Guerreiro et al. [20] using emerging global datasets and cloud computing.

The United Kingdom is one of the areas in Europe most affected by pluvial flooding. Around 5% of the urban population is exposed to an annual pluvial flood risk of 0.5% or greater [21]. It is estimated that, by 2050, 3.2 million people in urban areas could be at risk from pluvial flooding [21].

Not only European cities are affected by pluvial flooding. In Japan, approximately USD 1 billion in damage occurs annually due to pluvial floods affecting densely populated urban areas with poor drainage systems [22]. However, these pluvial events were recorded not only during heavy rainfall but also during moderate to low rainfall events.

Due to the deficient drainage infrastructure in the cities, these pluvial floods turn into dangerous flash floods and not only affect the economy but also lead to human losses as is the case for the city of Barranquilla (Colombia). In this city, during high rainfall events, the streets become torrential streams endangering pedestrians and drivers. Since there is no system that alerts in a timely manner the community about the danger of these floods, pedestrians and drivers trying to cross the streets are washed away by the dangerous streams [23].

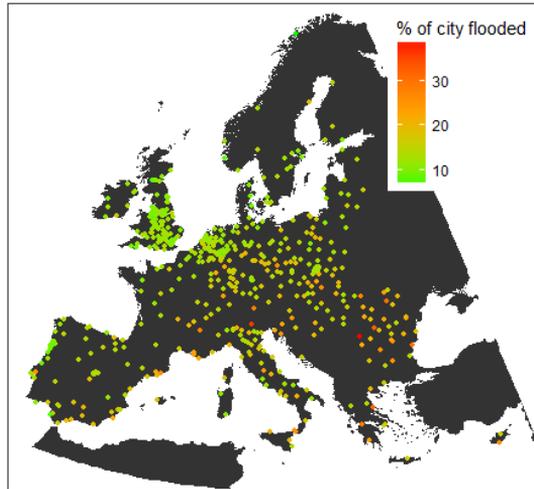


Figure 1.

Figure 1 Pluvial flood impact in European cities [20].

Chinese cities including Beijing, Shanghai, Guangzhou, Shenzhen, Nanjing, and Hangzhou are also affected by pluvial flash floods [24]. In July 2012, a pluvial flash flood event caused by road inundations was registered in Beijing and claimed 79 lives [25].

Pluvial flash floods are not simply caused by weather phenomena. They depend not only on the amount and duration of precipitation but also on the hydrological characteristics of the basin such as runoff magnitude, antecedent moisture condition, drainage area, soil type and land [26,27]. Hydraulic parameters, such as water level and water velocity, are variables that are involved in the loss of stability of people and vehicles during urban flash floods [23], and it is necessary to measure and monitor these parameters in real time. If, during rain events, water level and speed exceed safety levels, it is necessary for the alarm system to warn the community about the imminent danger.

Although there is a huge demand for understanding pluvial flash floods in cities, until now, few works have attempted to systematically examine the potential impacts of a pluvial flash flood in cities in order to develop efficient solutions [28].

In order to mitigate the risk of human losses and economic damages caused by floods in cities, measures of adaptation and minimization should be considered. The International Strategy for Disaster Reduction (ISDR) has classified these measures into structural and non-structural [29,30]:

(a) Structural measures

They include the construction of physical structures to reduce or avoid potential impacts of hazards such as protection, retention and drainage systems, as well as

the use of engineering techniques to improve resistance and community resilience [29]. Most of these measures involve a high investment of economic resources and implementation time is medium- to long-term.

(b)

on-structural measures

These actions do not involve building physical structures, but rather use existing knowledge, laws or policies to reduce risk and its impacts [29,31]. These measures are classified as passive and active. Active nonstructural measures are those that promote direct interaction with people, such as training, local management, early warning systems (EWS) for people, public information, among others. Non-structural passive measures involve policies, building codes and standards, and land use regulations.

Early warning systems are nonstructural tools useful to populations that do not have sufficient resources to minimize the risk of flooding. They are tools to reduce economic losses, and protect the life and property of a community [32]. Information sent by the EWS allows people to take action before the disaster takes place. Recent studies demonstrate that these systems have significant benefits that greatly exceed their costs [33]

The aim of this manuscript is to provide guidelines to develop an effective EWS for pluvial flash floods in real time. Understanding the hazard posed by pluvial flash floods in cities and the limited information available for EWS design to mitigate this risk is mandatory. The causes and variables that influence the formation of flash floods in urban areas, as well as the key elements of an EWS, are described. Likewise, different EWS for pluvial flash floods implemented worldwide were reviewed to determine the primary and secondary instruments used to measure the variables and the methods for processing information and alerting the community at risk.

Each architecture describes the instruments and methods used for the detection, monitoring and real-time analysis of variables related to flash floods and alert dissemination. From the reviewed projects, the most used instruments to measure hydrological and hydraulic variables during pluvial flash floods were selected. Also studied were the communication protocols to send the information and main media for alert dissemination.

In this review, we identified the need for forecasting and dissemination–communication processes to have fail-safe systems. These processes guarantee that the community receives timely alerts. However, none of the reviewed projects had a fail-safe system for these processes. The lack of these systems makes early warning systems more susceptible to the loss of measured data. Therefore, alerts cannot be sent timely to the community.

For this reason, this manuscript proposes a basic structure for an effective pluvial flash flood early warning system that guarantees the dissemination and

communication of alerts during rainfall events. This proposed EWS suggests which hydrological and hydraulic variables should be monitored in real-time during rainfall events; compares the characteristics of communication protocols and the most effective media to disseminate the alerts.

2. Pluvial Flash Flood Intensity

Developing techniques and criteria for solving the complex problems associated with runoff in urban areas is one of the most challenging tasks for hydrologic engineers. During high-intensity rainfall events, drainage systems become rapidly saturated. For this reason, soil cannot absorb the water quickly enough. There are a number of factors that affect the intensity of pluvial flash floods. Climate change, extensive and rapid urbanization and unsustainable urban development combined with management failure are considered the main factors for the development of pluvial flash floods. In general, higher precipitation intensity can result in an additional runoff. A deficient drainage system also increases the volume [6]. Likewise, there are other factors involved with runoff production processes such as soil characteristics, land cover, land use and basin conditions that increase the runoff intensity. This section briefly describes how climate change effects, urbanization, soil and basin characteristics increase the runoff intensity in urban areas.

2.1. Climate Change

A number of studies and reviews have assessed the influence of a combination of climate change and rapid urban development in flood risk [34–36]. In recent years, in China, the increment of high intensity and short duration rainfalls has been observed. Also, changes in the upper extremes of the distributions of high volume precipitation indexes have occurred in a broader area [37–39]. The increase of precipitation frequency and intensity aggravates the problem of pluvial flooding, representing a changing biophysical condition for urban areas [13].

2.2. Urbanization

Urbanization and vegetation area reductions are significant threats that affect water quality and increase the risk of flooding in urban areas. In the UK alone, over 80% of the population live in urban areas and the population has risen from 32 million in 1901 to 64.6 million in 2014 [40]. During the period 1990–2015, China's urban population increased from 302 million to 771 million, implying an average annual growth rate of about 6.2%. Over the same period, China's urbanized population had an average annual growth rate of 12% that was near twice the average annual growth rate of the overall population [41]

Urban densification, deforestation and inadequate urban drainage design have led to greater runoff volumes since the percentage of impermeable surfaces and compacted soils is greater [42]. Likewise, road grids, alterations to the natural vegetation, and sometimes channelization of streams have produced faster runoff [43].

2.3. Soil Characteristics

In urban areas, soil moisture and soil permeability are critical properties that influence the formation of flash floods. Soil moisture is considered the most important soil factor for rapid runoff and flash flooding because it can vary significantly, even on a sub-daily time scale [44]. In dry conditions, each soil has a specific rate at which it can absorb rainfall, called the infiltration capacity. When the rainfall rate exceeds the infiltration capacity, runoff will occur [6]. If the soils are saturated due to previous moisture conditions, the infiltration capacity is lower, resulting in higher runoff.

The infiltration capacity can also be affected by the permeability of the soil. This property depends on the different characteristics of the soil, such as texture, crust formation, soil compaction, soil contraction and expansion, microbial activity, soil hydraulic conductivity and root distribution. Soil texture is the most important [6,45] and indicates percentages of different grain sizes such as sand, silt and clay in the soil. Sandy soils have greater infiltration rates than clay and silt soils because sand particles are larger and more separated.

2.4. Basin Characteristics

The physical properties of a basin-like size, shape and surface roughness and its streams, influence the amount and the timing of runoff [6]. The size and shape of the basin directly influence the total volume of runoff that drains from that basin. In large basins, the runoff will take longer to reach its outlet than small basins because of the long distance to travel. In addition, rainfall events over larger basins will probably impact only a portion, but it could cover the entire small basin.

The relation between the infiltration rate and the basin's slope is inversely proportional. If the basin's slope increases, the infiltration rate decreases. The reason is that gravity pulls less water into the land surface and more water across that surface [43]. Unlike the basin's slope, surface roughness has a directly proportional relation with infiltration rate; reducing channel roughness causes less infiltration and faster streamflow velocities [6].

3. Early Warning System Basic Architecture

This section describes the architecture of an early warning system for the dissemination of timely alerts during pluvial flash floods. EWS is understood as a

set of procedures, steps or key elements related and interconnected with each other [46]. The United Nations has defined early warning systems as “An integrated system of hazard monitoring, forecasting and prediction, disaster risk assessment, communication and preparedness activities systems and processes that enable individuals, communities, governments, businesses and others to take timely action to reduce disaster risks in advance of hazardous events” [29]. According to the World Meteorological Organization (WMO) and International Strategy for Disaster Reduction (ISDR) [4,16] the architecture of an effective EWS is divided into the following key elements or structures: Disaster risk knowledge, Forecasting, Dissemination–Communication and Preparedness–Response.

(a) Disaster Risk Knowledge

An event becomes a disaster when it abruptly affects a community’s daily activities and involves human and material losses and has economic or environmental impacts [46]. It would also be considered as a disaster when damage exceeds the community’s ability to respond with their own resources [18]. When there is a greater knowledge of the risk to which a population is exposed, this leads to the improvement of the processes of risk management, reduction and adaptation [47,48]. The knowledge contains information that can be used to make decisions and actions that allow the community to improve their capacity to react to disaster risk in a timely manner [49,50].

In this key element, it is necessary to identify hazards, the exposure, vulnerabilities and risks of a population. According to the United Nations Office for Disaster Risk Reduction (UNISDR) [29], a hazard is any substance, phenomenon or situation that affects a community and has the potential to damage people and their property. The hazards can be classified into natural, biological, technological and societal. Hazard identification implies what might happen and where.

Vulnerability relates to a number of factors such as physical, economic, social and

environmental [51]. The Asian Disaster Preparedness Center defines the concept of *vulnerability* as “the factors or constraints of an economic, social, physical or geographic nature, which reduce the ability to prepare for and cope with the impact of hazards” [52]. The UNISDR defined *vulnerability* as “the conditions determined by physical, social, economic and environmental factors or processes which increase the susceptibility of an individual, a community, assets or systems to the impacts of hazards” [29].

The exposure is “The situation of people, infrastructure, housing, production capacities and other tangible human assets located in hazard-prone areas” [29].

The risk is “the probability that negative consequences may arise when hazards interact with vulnerable areas, people, property, environment” [52].

To reduce the risk of flooding in urban areas, the data collected should be relevant and concise, qualitative or quantitative, and should be obtained through official sources [16,53]. The following areas should be covered:

- Historical background
- Geographical aspects
- Environmental and physical aspects
- Socio-cultural aspects
- Economic aspects

Likewise, vulnerability assessment of the area at risk is necessary. The various components and essential functions of a city that may be at the heart of possible dangers should be considered [54]. Furthermore, the dynamic nature of hazards and vulnerabilities arising from processes such as urbanization, environmental degradation and climate change should be taken into account [16]. Developing a risk map allows the needs of the early warning system to be prioritized and preparations for disaster prevention and response to be guided [55].

The following questions must be answered:

- Are the hazards and the vulnerabilities well known?
- What are the patterns and trends in these factors?
- Are risk maps and data widely available?

To answer these questions, Fakhruddin et al. [56] propose an assessment methodology for flood risk by elaborating a map. The elaboration of the map is divided into two sections:

- First, the initial data processing, establishment of the hydrological model to predict runoff, probability analysis and elaboration of a flood risk map is performed.
- Second, interviews, discussion groups and workshops are conducted with the community at risk to determine vulnerability, taking into account community perceptions and historical records.

Finally, the result of these processes resulted in the development of an integrated system, flood risk map and response option.

Once a detailed risk map is made and relevant information from the area is obtained, the warning design must be established. This process is complex and requires the integration of different activities, devices and the processing of large volumes of information. The Forecasting section describes the procedure for designing timely, clear and useful alerts for the community.

(b) Forecasting

For urban flash floods, the main goal of this key element is forecasting and establishing alert levels in real time. This process is divided into two sections: Monitoring and Information Processing. The Monitoring section monitors and transmits information on meteorological and hydraulic variables related to urban flash floods [57].

The Information Processing section receives the data of the meteorological and hydraulic variables, and through analysis tools, computer models and simulator design alert [58].

The forecasting process requires the use of a number of technologies and areas of expertise for the analysis of large volumes of data and predictions based on simulations. These technologies include sensors to measure meteorological and hydraulic variables and computational models and simulation software to process the information. It is necessary to provide an advanced visualization technology to interact with people at risk and a decision support system with remote access to assist public authorities and citizens in timely decision making [48,59].

According to the UNISDR [46], this section should answer the following questions:

- Are the right parameters being monitored?
- Is there a scientific basis for making forecasts?
- Can accurate and timely warnings be generated?

As part of the decision support tools during high rainfall events, different runoff and hydraulic models are available for urban flooding forecasting. They are a rainfall-runoff model and hydrodynamic models in 1D, 2D and 3D. Most of these models use as input the measurements of the amount of precipitation, water level and water velocity. Therefore, these variables should be monitoring in real time [60,61].

The alerts must be sent in a timely manner and the message transmitted must be clear and understandable for all people. The Dissemination–Communication section details the characteristics of alert messages during flash floods and the means used to send them.

(c) Dissemination–Communication

Sending and communicating warnings is the determining step between forecast and action [62]. Dissemination refers to sending the warning, while communication is achieved only when the information is received and understood [16]. Sending the alerts to people at risk during high-intensity precipitations is an extremely important phase in which the message should be simple and useful. This allows for adequate responses that help safeguard lives and livelihoods [55]. Dissemination and communication systems for alerts should be able to answer the following questions:

- Do warnings reach all those at risk?
- Are the risk and warnings understood?
- Is the warning information clear and usable?

To achieve positive answers to these questions, alerts must be available in different formats, such as text, graphics, colour coding, audio, etc. This facilitates the reception and action on warnings. According to the WMO [16], for alerts to be effective, their content should be brief, concise, understandable, and answer questions such as “What?”, “Where?”, “When?”, “Why?” and “How to respond?”. Also, detailed threat information using localized geographic references should be included. Dissemination of alerts must be done through multiple channels in order to reduce delays in delivery to end-users, as well as ensure it reaches as many people as possible. Channel failure should be prevented [4,53]. Likewise, credible sources, pre-identified and approved, should deliver warnings. Measures must be taken to promote trust among the public so that prompt action is taken once the message is received [63]. Some actions included are as follows:

- Dissemination of warnings through organizations or leaders
- Sending warnings through multiple credible sources
- Periodic and constant warnings
- Scientifically certified warnings

According to The Economist Intelligence Unit, Hong Kong is considered to be one of the safest cities in the world today, due to its ability to prepare and respond to disasters [54,56]. In 2015, they carried out a study to assess the preparedness of Hong Kong residents for community disasters and to identify factors that affect their behaviour during these events [31]. A total of 1023 residents aged 18 years or more were interviewed to answer a 19-item questionnaire, which evaluated the following aspects of disaster preparedness and response:

- Having information regarding their preparation
- A communication plan, evacuation strategies
- First-Aid and disaster knowledge
- Financial resilience
- Preparedness behaviours

Table 1 shows survey results regarding which sources people would use during a disaster. The study found that people over 65 were more likely to seek information through television and radio, while younger people responded more to social media.

Table 1 Preference of information sources during a disaster.

Source	Population Surveyed
Television	52%
Facebook	18.9%
WhatsApp	9.6%
Radio	8.2%
News Agency Websites	6.1%
Government Websites	2.9%

Regarding which information they considered most important, the results show the following:

- (1) Places to seek medical attention (92.2%)
- (2) Evacuation routes (85.2%)
- (3) Shelter information (84.8%)
- (4) Details of the disaster (67.4%)
- (5) Missing persons (65.2%)
- (6) Victims (45.2%)

For the communication process, 65% of respondents would use emergency contact numbers on their mobile phones, but 73.1% had password-protected phones. In the event that the mobile phone network failed, 37.4% of the respondents stated that they would use a landline to communicate with their family, 32.5% said they would go home and 4% reported having a place to meet your family. This study concludes that, ultimately, most residents are interested in receiving additional information on disaster preparedness through the Internet using mobile devices and television.

EWS are considered effective not only when an alert is sent in a timely manner but when this alert is correctly understood and the community takes protective actions [64]. This implies active community participation in the design of EWS, as well as the preparation and response to the risk of flash floods.

(d) Preparedness–Response

Disaster preparedness includes all the activities necessary for a community to react to such an event [65]. It is necessary for the community to receive and correctly interpret issued alerts, so they may draw the necessary conclusions for actions to be taken, such as alerting local police or firefighters [64]. Many deaths have been recorded during flash floods worldwide, as people try to drive or walk across the streams of water unknowingly or poorly assessing the risk [63,66]. Therefore, it is necessary not only to issue flood warnings in a timely manner but also to identify the community’s perception of

flash floods and the factors that influence their responses when receiving the warning.

The results of a public survey of 418 people in Boulder, Colorado, USA, on how people perceive, understand, and respond to flash floods and warnings received through different means were presented in 2015 [67]. They establish that people have different perceptions and concepts about flash floods and understandings of risk. The survey structure was divided into three main sections:

- (1) Perceptions and understandings of flash flood risks
- (2) Perceptions and interpretations of flash flood forecasts, warnings, and other alerts
- (3) Protective decision making in response to flash flood warnings

In Section 3 of the survey, the ability of people to take protective measures during flash floods was examined. The survey mentions different types of warnings that could be sent during a flash flood and respondents answered what they will do if they heard the warning while driving, while in a building on the ground floor or below, or while outdoors. Table 2 shows the alert messages and the response actions of the respondents. The column on the left shows the warnings, the central column shows the percentage of respondents coded in that category, and the column on the right shows the responses obtained in this survey.

Table 2 Summary of respondents’ descriptions of actions that a person should take in response to a flash flood warning [67].

Action	% of Respondents	Example Public Response (s)
Move to a higher location	84%	“Climb to safety”
		“Run to higher ground”
		“Get to higher ground and hold on”
		“Climb a tree...”
		“Get to a multilevel building and get to the top”
		“Drive uphill, get out of the car and continue uphill on foot”
Move to a different location	18%	“Get as high as possible”
		“Drive to flatland, away from Boulder Creek away from mountains and to higher land”
		“Run like nuts”
Avoid risky areas	12%	“Get to nearest safety shelter, hospital, firehouse”
		“Stay away from creeks + rivers”
		“Move away from creek areas”

		“Find higher ground away from electric lines”
Go inside	10%	“Get inside a strong building” “Go in a commercial building or knock on a door”
Assess situation	4%	“Think! Assess the vulnerability of location and act accordingly...” “Determine if the flood will be in your area and take appropriate action” “Have high ground picked out nearby and go to it if you see the water and debris coming”
Be alert	3%	“Raise alert level and make a plan for possible action” “Be aware of nearby floodways/drainages”
Seek more information	1%	“Try to obtain more info about where to go for safety”
Depends	7%	“Go to a higher place or leave the area if there is time” “It depends on where you are?”
Don’t know	1%	“Honestly, I have no idea”
Other	8%	“Check to hear if it is a practice warning or a real one—then call loved ones and go to a safe location” “Call for help and look for high ground”

It is necessary not only to notify people about the danger of a sudden flood but also to motivate them to take protective measures. According to Quevauiller and Innocenti [68], the following recommendations could improve people’s response:

- Institutional and social conditions that must be fulfilled to ensure timely decision-making regarding the warnings should be as follows:
 1. Alert dissemination and communication
 2. Clarity regarding responsibilities in case of warning
 3. Preparing authorities and communities to respond to the disaster
- The involvement of local communities and authorities in the design of EWS increases the effectiveness of the entire early warning process and thus leads to a greater and better response to an alert.

According to the ISDR, each key element has key actors that should be involved to develop a people-centred Early Warning System. Table 3 shows the key actors for each key element.

Table 3 Key elements and Key actors of an Early Warning System [55].

Key Element	Key Actors
Disaster risk knowledge	<ol style="list-style-type: none"> 1. International, national and local disaster management agencies. 2. Meteorological and hydrological organizations. 3. Geophysical experts 4. Social scientists 5. Engineers 6. Land use and urban planners 7. Researchers and academics 8. Organizations and community representatives involved in disaster management
Forecasting	<ol style="list-style-type: none"> 1. National meteorological and hydrological services 2. Specialized observatory and warning centres 3. Universities and research institutes 4. Private sector equipment supplier telecommunications authorities 5. Quality management experts 6. Regional technical centres
Dissemination and communication	<ol style="list-style-type: none"> 1. International, national and local disaster management agencies 2. National meteorological and hydrological services 3. Military and civil authorities 4. Media organizations (print, television, radio and online) 4. Businesses in vulnerable sectors (e.g., tourism, aged care facilities, marine vessels) 5. Community-based and grassroots organizations 6. International and local agencies
Preparedness and response	<ol style="list-style-type: none"> 1. Community-based and grassroots organizations 2. Schools, universities and informal education sector. 3. Media (print, radio, television, online) 4. Technical agencies with specialized knowledge of hazards

Another feature of the effectiveness of an EWS is that the key elements must be interrelated. The activities carried out in each section should be aimed at the satisfactory development of the following section.

4. Real-Time EWS for Pluvial Flash Floods

This section presents different architectures of early warning systems for pluvial flash floods implemented worldwide. Each project installed different types of sensors to monitor variables used in urban flood forecasting and modelling.

Wireless communication was the most used technology for transmitting data to the processing centre. On the other hand, each one developed a different method for information processing and alert dissemination.

4.1. Florida, United States

Chang and Guo [69] proposed a motes-based sensor network for water level monitoring and real-time video delivery of channel status. This system consists of three modules: Ultrasonic Water Level Monitoring Module, the Network Video Recording Module and Data Processing Module. All modules are connected to a photovoltaic system for power supply. Figure 2 illustrates a general structure of motes-based sensor network for the Florida (United States) project.

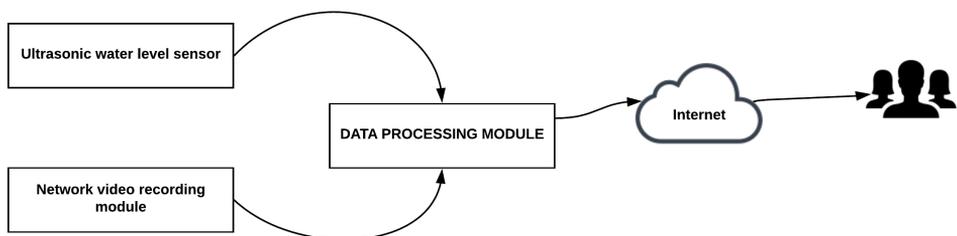


Figure 2 General structure of motes-based sensor network for the Florida (United States) project.

- The *Ultrasonic Water Level Monitoring module* uses an ultrasonic sensor to measure water level and it is connected to a data acquisition board and this, in turn, is connected to a wireless system. The wireless system is an MDA300CA unit manufactured by Crossbow Technology (Milpitas, United States) and uses IEEE 802.15 standard to send the information to the data processing module
- The *Network Video Recording Module* is composed of a group of cameras installed at main intersections. Cameras provide traffic monitoring information in video and images. This system includes four Redeye Z205 network cameras (company, city, state abbrev if USA, country) and can be connected via Ethernet to the data processing module. Each camera has an IP address assigned to which users will have access from any Web searcher.
- The *Data Processing Module* combines all sources of information. This module provides three types of information: raw data, predicted data, and video information. The raw data is the information obtained by the sensors, while the predicted data are obtained through mathematical models. All of this must be accessible online.

4.2. Barranquilla, Colombia

The city of Barranquilla is located in the Caribbean Region of Colombia and does not have an efficient rainwater drainage system; therefore, during rainy events, streets become dangerous streams called “arroyos” [70,71]. Researchers at the Universidad de la Costa developed an EWS with a wireless sensor network and a WEB application [72]. Figure 3 illustrates the Wireless Sensor Network (WSN) architecture in the Barranquilla (Colombia) project.

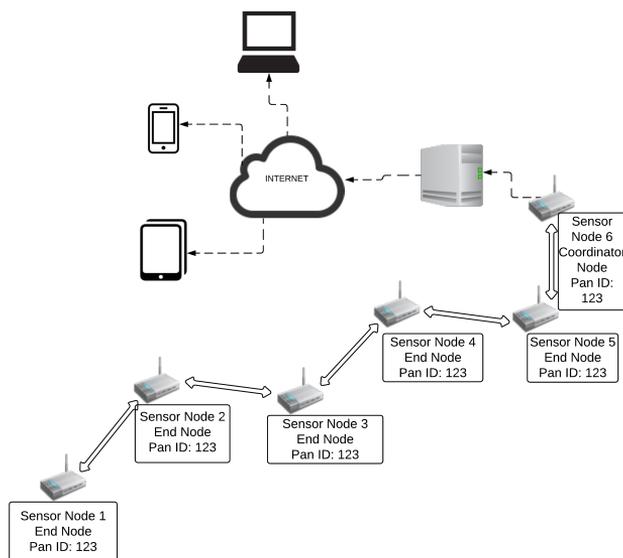


Figure 3 *Wireless Sensor Network (WSN) architecture in the Barranquilla (Colombia) project.*

The *wireless sensor network* has six nodes and each node has a temperature, humidity and atmospheric pressure sensor connected to a mote (Wasmote from Libelium, Zaragoza, Spain) and powered by a photovoltaic system. This system was used by Ramírez-Cerpa et al. [73] to determine through an analysis the influence of the variation of these atmospheric variables in the formation of precipitations that cause flash floods in the city of Barranquilla. Information obtained via nodes is sent to a server using Zigbee technology with the XBee-PRO ZB (S2) radio module [74]. This module uses ZigBee technology under the IEEE 802.15.4 standard to communicate with other nodes and with the base station. Previously, in Caicedo-Ortíz et al. [75], a test was conducted to verify the transmission range of the Wasmote pro. It established an efficient communication between the transmitter node and the receiving node at a distance of 1000 m with line of sight.

A server receives the data from the wireless sensor network and, through a Web and mobile application, gives information to end-users.

4.3. Manila, Philippines

In two streets near the Manila subway, a real-time urban flood monitoring system was installed [76]. A flood prediction model was developed to identify flooded streets and alternative routes for drivers. The system is divided into three main sections: Electronic instrumentation, Server and Web services.

The *Electronic Instrumentation* has a ground-based pressure sensor and a tipping bucket rain gauge connected to the data logger and powered by a photovoltaic system. The obtained information is sent through a General Packet Radio Service (GPRS) module to a server. Two nodes were installed on two nearby streets (Eamshaw and San Diego) on Boulevard Spain, Manila.

The *Server* receives the data and processes it to provide real-time information. A Web application provides real-time information, historical data and flood data to users. Likewise, a mobile application shows the real-time variation of flash floods in the streets so that users can adjust their routes and travel schedules. Figure 4 illustrates the urban flood monitoring system for Manila (Philippines) Metro project

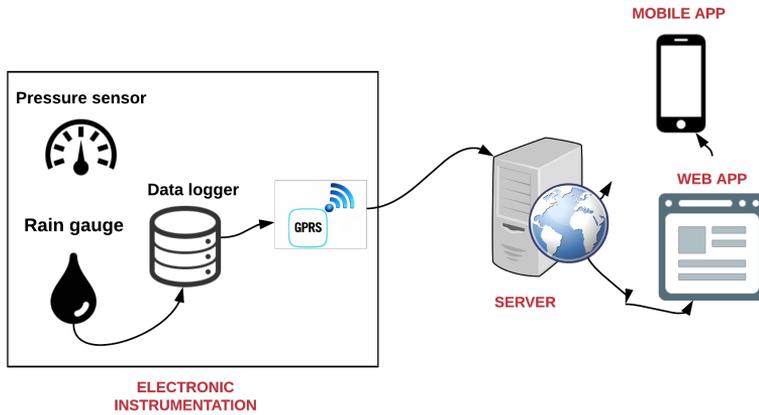


Figure 4 Urban Flood Monitoring System for Manila (Philippines) Metro project

4.4. Nakhon Si Thammarat, Thailand

In Nakhon Si Thammarat, a province in southern Thailand, a wireless flood monitoring system was developed for the mitigation and management of flood disasters in urban and suburban areas [77]. The system consists of two main modules, Remote Site and Control centre, as shown in Figure 5.

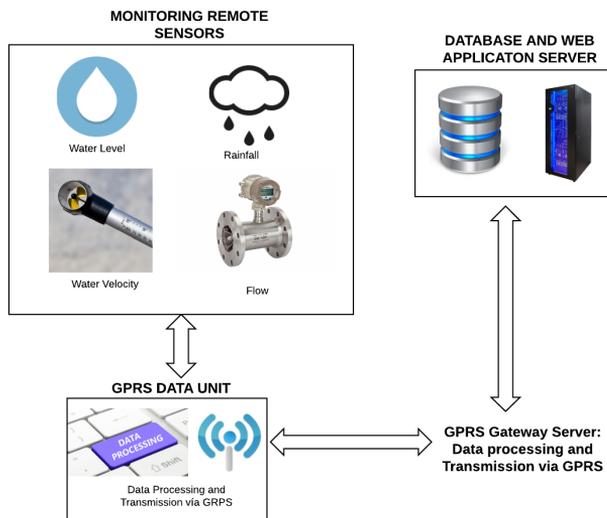


Figure 5 Wireless flood monitoring system implemented in the Nakhon Si Thammarat project [77]

The *Remote Site*. The monitoring section contains 15 remote devices located around the Nakhon Si Thammarat flood risk zone. A tipping bucket rain gauge was used to measure the amount and intensity of the rain. These remote devices use an ultrasonic Doppler instrument called STARFLOW (Unidata, Perth, Australia) to measure water level and velocity. Since the STARFLOW equipment is very sensitive to fluctuations in water velocity in the channel, the average velocity was used in a time interval rather than raw measurement data. The STARFLOW unit is connected to the GPRS Data Unit (GDU) and sends the information every 10 min to the control centre

The *Control Center* has a server that contains the historical database, processes in real time the information and displays it through a WEB application. End-users can access this system through the Internet or mobile devices. The alert messages are also sent via text messages (SMS), FAX and email to the community.

To avoid unexpected power disruptions, an uninterruptible power supply (UPS) and a surge protector was installed. This allows the whole equipment to work for at least 24 h with a continuous electrical energy supply when not available.

4.5. Mayagüez, Puerto Rico

The University of Puerto Rico, Mayagüez (UPRM) campus developed a weather radar network that provides accurate and real-time hydro-meteorological information to the west region of the island [78,79]. These radars have a temporal resolution of 3 min, spatial resolution of 15 m and operate at a frequency of 9.1 GHz. The information obtained by the radars is sent to a data centre placed at Mayagüez campus with a high-performance directional grid parabolic antenna with a frequency of 2.4 GHz. A photovoltaic system provides the power supply to the radars and the data is deployed in a Web application.

This weather radar network information was used to develop a flood alert system in western Puerto Rico for convective precipitation of time periods of a few hours or less (nowcasting) [80].

Weather radars provide information on cloud reflectivity and this data can be transformed into rainfall amount using empirical equations. There is an empirical relationship between the amount of precipitation and radar reflectivity, which in turn depends on the distribution of raindrops. The Rain Rate R (mm/h) is related with the reflectivity factor Z ($\text{mm}^6 \text{m}^{-3}$) through the Marshall–Palmer [81] equation:

$$R \left(\frac{\text{mm}}{\text{h}} \right) = 0.036 \times 10^{0.625 * \text{dBZ}} \quad (1)$$

Knowing the precipitation rate of different hydrological models for the prevention of floods can be developed thus enabling the community to be informed opportunely. Likewise, the aeronautical operations can be planned with greater precision [71].

Torres-Molina [80] used equation 1 to obtain the precipitation rate from weather radars and routed through a rainfall-runoff model *Vflo*. Using a coupled rainfall-runoff forecasting procedure obtained results with lead-times of 10, 20 and 30 min. These results were analyzed and compared using statistical methods. The flooding model *Inundation Animator* showed the extent of flooding superimposed onto a land map.

4.6. Barcelona, Spain

Llort et al. [82] presented a pluvial flood EWS, called FloodAlert, based on the use of radar observations to issue local flood warnings. This project, like the one developed in Mayaguez (Puerto Rico), uses the radar data and through the climatological Z–R relationship converts the reflectivity measurement into the amount of precipitation (mm/h).

Due to different errors affecting radar precipitation data, this project implemented a quality control process that includes statistical calibration of radar reflectivity estimations, correction of non-meteorological echoes and correction for underestimation due to beam blockages.

This project not only provides real-time radar information but also the precipitation movement field can be calculated using the last radar observations by means of cross-correlation techniques. Once both the radar data and radar nowcasting is available, the system calculates the 30 min accumulation in a moving window scheme.

To visualize the information, a web platform dynamically displays geo-referenced information of real-time radar observations and nowcasting. Likewise, the areas are shown that will be potentially affected by rainfall accumulation in 30 min exceeding the user-defined thresholds and the evolution of the maximums of the 30 min accumulation in the intelligent area surrounding the point of interest.

In order to send the alerts, this system uses email and text messages and the devices can be configured under different profiles (e.g., standard, 24 h, weekends, emergency, etc.). For example, on 29 October 2013 for an observation point in Palma de Mallorca, the forecasting accumulation values (30 min accumulation) exceeded the user-defined red threshold and an email was sent 90 min before the flooding at the city caused several problems. In the email, the top panel shows the

areas forecasted to be over the thresholds (5, 10 and 20 mm/30 min in this case) and how those areas affect the point centred in the city.

Unlike the other projects reviewed, this one does not describe the type of communication used to send the information to the data processing centre, or if the data was processed at the radar installation site. Similarly, it does not describe the power supply system.

Table 5 summarizes the instruments implemented in the projects mentioned above to measure the variables related to the formation of pluvial flash floods. Likewise, Table 5 shows the communication protocols to send sensors' data, the alert dissemination methods and the power supply system.

All the reviewed projects focused their early warning system design on the forecasting and alert dissemination processes. The project developed in Nakhon Si Thammarat (Thailand) included the greatest number of hydrological and hydraulic variables for establishing alert levels. Likewise, this project used more than three communication channels to send alerts but it was the only one that was connected to the electrical grid.

Table 5. Instruments, communication protocols and methods for alert dissemination.

Location	Sensors		Communication System	Alert Dissemination	Power Supply
	Type	Variables to Measure			
Nakhon Si Thammarat, Thailand	STARLFL OW Ultrasonic Doppler sensor	Water level and velocity	GPRS module	Web application, SMS, FAX, email.	Connect ed to the electrical grid and UPS
	Tipping bucket rain gauge	Amount of rain			
Florida, United States	Ultrasonic sensor WL700	Water level	Wireless unit	Online access to raw and predicted data, video information	Photovoltaic system
	Redeye Z205 Cameras		(IEEE 802.15)		
Barranquilla, Colombia	Humidity sensor	Atmospheric variables	ZigBee	Web and mobile application	Photovoltaic system
	Temperature sensor		(IEEE 802.15)		
	Atmospheric pressure				
Manila, Philippines	Pressure sensor	Water level	GPRS module	Web application	Photovoltaic system
	Tipping bucket rain gauge	Amount of rain			
Mayagüez, Puerto Rico	Weather radar	Radar reflectivity and amount of rain	Parabolic antenna (IEEE 802.15)	Web application	Photovoltaic system
Barcelona, Spain	Weather radar	Radar reflectivity and amount of rain		Web application, SMS, E-mail	

5. Discussion

With regard to pluvial flash floods, for an early warning system to be effective, the alerts must be issued timely, be clear and understandable to the entire community at risk. Through this review, the key elements of an EWS for flash floods in urban areas were described as well as the variables that influence their formation.

Early Warning Systems implemented in different locations worldwide were reviewed to identify the main elements used for the forecasting process such as measurement instruments, data transmission protocols and power supply equipment, as well as information processing methods. Also reviewed were the means and strategies for alert dissemination to the community.

5.1. Forecasting Process

The forecasting process is linked to the detection, monitoring and analysis of meteorological and hydraulic variables related to flash floods. It can be carried out using various instruments and methods, but there are indispensable devices for this work.

From the reviewed projects, three considered the amount of rain (mm) as a basic element for the development of alerts for urban flash floods. The most used instrument for direct precipitation measurement is the rain gauge and for indirect measurement is weather radars.

Rain gauges measure the liquid precipitation expressed in mm during a period of time. Once this measure is registered, it is sent to an information-processing centre. The reviewed projects implemented tipping bucket rain gauges and consist of a light metal container or bucket divided into two compartments. The liquid precipitation is collected into the uppermost compartment and, after a predetermined amount has entered, the bucket becomes unstable and tips toward its alternative rest position [83].

Weather radars are widely used instruments to locate precipitation, identify the types and monitor their movements. This instrument emits microwave pulses and measures the reflected signal from the raindrops [84]; the higher the reflected signal value, the higher the rain intensity.

One of the advantages of weather radars is that they have a higher coverage than rain gauges. Since they can also monitor the movement of the clouds, weather radars can predict phenomena ahead of time, and serve as a backup system in case the on-site devices are removed by flooding or high winds. However, weather radars are more expensive than rain gauges, have higher power consumption and need more technical and social requirements for their implementation.

Three projects included sensors for measuring the water level and can be classified into pressure sensors and ultrasonic sensors. Pressure sensors measure the uniform weight of a column of water. Since weight is a force, a column of water with a specific height will always exert the same amount of pressure on the sensor. At the output, the sensor produces a voltage equivalent to the received pressure and then this voltage value translates it to a level measurement [85].

Ultrasonic sensors send a sound wave with a specific frequency to an object and receive the reflected sound wave. The sensor measures the distance by calculating

the sending and receiving time of this sound wave [86]. Ultrasonic sensors are not affected by colour, transparency of objects, design or type of surface. They are resistant to external disturbances such as vibration and ambient noise. These sensors have great accuracy and they are easy to connect with different interfaces [87]. However, environmental variables such as air temperature and humidity can affect the echo transit time and therefore the measurement accuracy of an ultrasonic sensor [88].

Ultrasonic wave propagation speed depends on both the nature of the propagation medium and the temperature. When the air temperature and humidity increase, the speed of sound increases and the reach is shorter. This reduction is not linear and differs from sensor to sensor [89].

For some applications, one of the disadvantages of the ultrasonic sensor is that it cannot work underwater, but for flooding applications, this is suitable because the streams sweep away different objects that can collide with the sensor, introducing wrong measurements and causing damage to the equipment. Thus, it is suggested that non-submersible sensors be used for the implementation of early warning systems for flash floods in urban areas.

For the communication technology implemented to send the sensors' data, most of the reviewed projects used wireless communication. Wireless modules under IEEE 802.15 standard and GPRS modules were implemented to send the information from the measurement stations to a data centre. However, these projects only implemented one communication channel for sending the data. If there are failures in the communication system, the alert will not be timely. Therefore, it is necessary to have a minimum of two communication channels for sending the alerts.

Ch. Saad et al. [90] performed a comparative analysis of wireless communication protocols for intelligent sensors with a focus on their performance. Table 6 presents the differences between some wireless communication protocols in terms of the frequency band, the range of coverage, max data rate and transmitted power.

Table 6. Differences between wireless communication protocols.

Protocols	Bluetooth	Ultrawide Band (UWB)	ZigBee/IP	Wi-Fi	Wi-Max	GSM/GPRS
Frequency band	2.4 GHz	3.1–10.6 GHz	868/915 MHz;	2.4; 5 GHz	2.4;	850/900;
			2.4 GHz		5.1–66 GHz	1800/1900 MHz
Nominal range	10 m	10–102 m	10–1000 m	10–100 m	0.3–49 km	2–35 km

Max data rate (Mbit/s)	0.72	110	0.25	54	70	0.168
Bit time (µs)	1.39	0.009	4	0.0185	0.0143	5.95
Transmitted Power (W)	0.1	0.04	0.0063	1	0.25	2

The transmission time of a wireless system depends on the data rate, the message size, and the distance between two nodes [91]. From Table 6, GSM/GPRS has the lowest data rate, therefore, its transmission time is longer than the other protocols. Likewise, GSM/GPRS has the highest power transmission consumption, but it has the best range of coverage from these protocols.

During high rainfall events, the power supply may fail. It is recommended to have a photovoltaic system connected to the equipment as a primary source of power supply or as a backup system in case of failure. Almost all projects use photovoltaic systems to supply electricity for measuring and communication instruments. Only one project was connected to the electric power grid and used a UPS as a protection measure.

Information processing is carried out in a data centre equipped with applications, and analysis software necessary for alert design. The data centre processes the sensor data and transforms it into alerts in real time. Some of these data centres have a historical database and provide online access to them like the projects implemented in Nakhon Si Thammarat (Thailand) and Florida (United States).

Figure 6 consolidates the overall structure of the forecasting process with the main and secondary elements. It also shows the communication protocols used in the reviewed projects to transmit the information from sensors to a data centre.

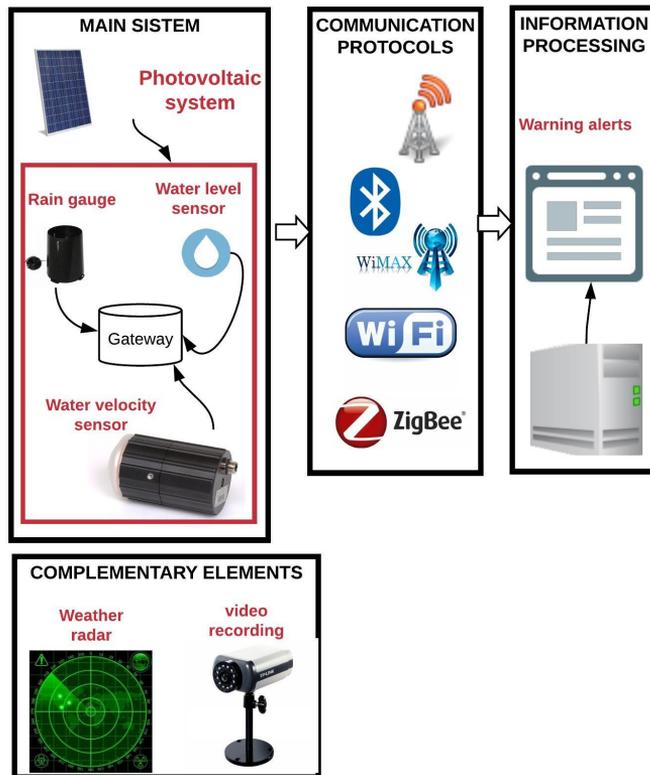


Figure 6. Consolidated forecasting process structure with main and complementary elements.

The measurement of water velocity as a hydraulic variable should be included in all pluvial flash flood EWS. The parameters, water level, water velocity and their combined effect, are responsible for the stability loss of pedestrians and drivers when trying to cross hazardous streams.

5.2. Dissemination Process

The dissemination of information must be timely, gathered and understood by the whole community. Warnings must be simple, clear and useful messages so that opportune decisions may be taken. It is necessary to have an integrated system that allows the information to be sent through different channels, ensuring that it is received and understood by everybody.

Studies by Fakhruddin et al. [56] and Lam et al. [31] agree that the preferred channel for receiving information is television. However, younger people prefer to receive information through digital media and the use of social networks. Older people show their preference for using radio and audio alerts such as sirens.

The most used methods for sending alerts to the community at risk were Web and mobile applications. Four projects developed a Web application to visualize the alerts, water level and precipitation measurements. One of these projects developed a mobile application too.

Another project offers online access to raw data and video information. However, none of the projects integrated television or radio to send the alerts.

According to WMO, the alerts should be brief, concise and understandable [5], but during high precipitation events it is also necessary to send the alerts through different communication channels. This will avoid the loss of messages due to channel failures; nevertheless, just two projects had more than one media for sending alerts.

Television and radio were not included in any of the reviewed projects for alert dissemination, but they are very useful media for broadcasting messages to a large part of the population at risk. Likewise, an up-to-date system that visualizes streets during floods and applications that provide alternate routes for drivers is ideal. Figure 7 shows the different media that can be used for the dissemination of alerts according to this review.

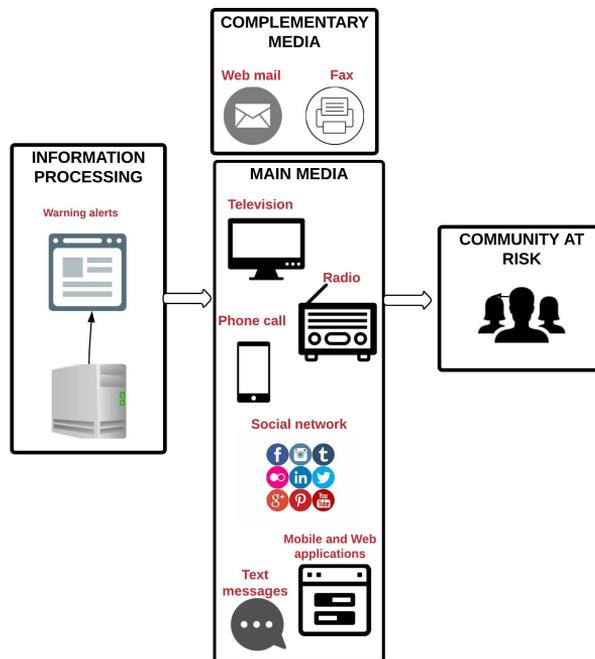


Figure 7. Main and complementary media used in reviewed projects for alert dissemination.

Taking into account the guidelines provided in Section 3 for each key element of a pluvial flash flood EWS and the instruments, methods and media implemented in the reviewed projects for forecasting and alert dissemination, an effective and real-time pluvial flash flood Early Warning System is proposed. Figure 8 shows the main and secondary elements of each key element of the pluvial flash flood EWS proposed in this review.

Disaster risk knowledge is a necessary phase, prior to EWS design. It comprises identification and mapping of the risk. First, hazards, exposure, vulnerabilities and risk in the population are identified. This information must be obtained from official sources and must be relevant and concise. The next step is to develop a risk map to prioritize the EWS's needs and guide preparations for disaster prevention and response.

The forecasting process is divided into four sections: main section, complementary elements, communication protocols and information processing. The main section is compounded by water level and water velocity sensors and the rain gauge. This set is powered by a photovoltaic system. Radar and video cameras can be considered as complementary elements. Weather radars are the most suitable instruments for monitoring during extreme rainfall events but they are quite expensive. Figure 8 presents different wireless communication protocols to send the information to the main system. It is necessary to implement at least two different protocols for redundancy. In case of failures in one protocol, the data can be sent timely to the information-processing centre and without loss of packages. This centre is in charge of the data processing and designs the flood warnings.

Once the alerts are ready, there are different media to send them. Web and mobile applications were implemented in all the reviewed projects to visualize the alerts, but it is necessary to have more than one channel to cover the entire community at risk. Television is the preferred media to receive the alerts, but government support is needed to be able to send broadcast messages [56].

Sending warning messages to the community at risk is not the last action in an EWS. The communication is established when people receive, understand the message and take timely decisions. To achieve this, it is necessary that the community and the local authorities participate actively in the decision-making process. One proposal on this topic is the project named FloodCitiSense “Early warning service for urban pluvial floods for and by citizens and city authorities”. The aim of this project is to reduce urban areas and citizen vulnerability to pluvial floods. They propose integrating crowdsourced hydrological data measured by different participants such as citizens, local authorities, research units and industrial partners. Furthermore, they suggest implementing low-cost sensors and web-based technologies to display warnings [92]. This project will be developed during 2017–2020.

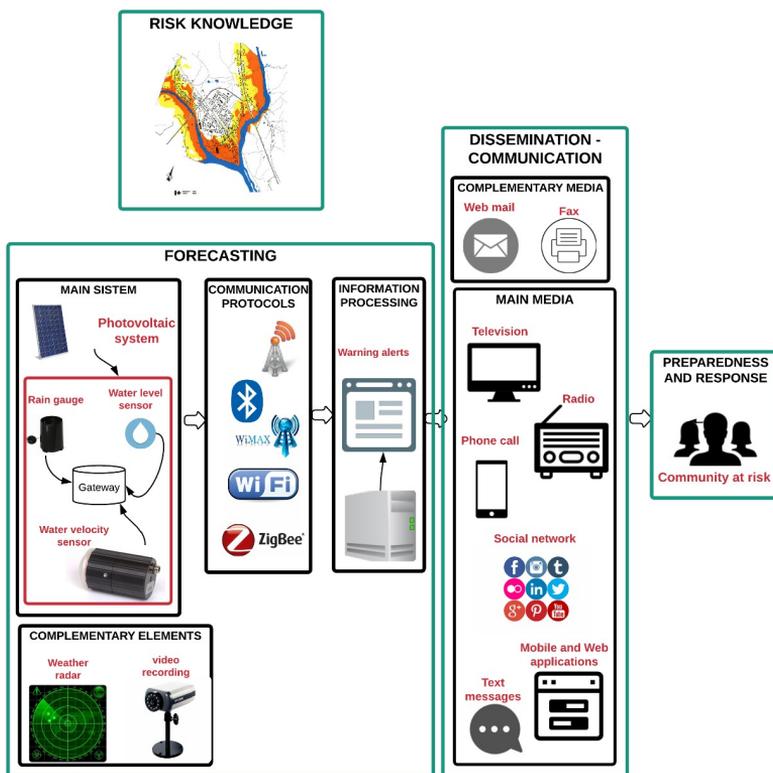


Figure 8. Key elements of the proposed pluvial flash flood early warning system.

After implementation of an early warning system, it is very important to measure its performance in order to determine its effectiveness. Parker [93] mentioned the most common ways of measuring flood warning performance. They are classified in technical and social measures. The following characteristics are related to technical measures:

Probability of detection

Accuracy: Forecast flood levels compared with measured flood levels.

Reliability: Flood-hit, miss and false alarm rates.

Probability (i.e., uncertainty): Amount or percentage of certainty/uncertainty associated with the forecast

Time range ahead of the flood: How far ahead in time a forecast can be made

Timeliness: Warning lead time

Spatial resolution: The smallest area for which a forecast can be made

According to Parker [93], to measure the EWS acceptance by the community, social survey responses are required that consider the following characteristics:

Warning information: Recipients' assessments of the degree to which the warning provided them with the flood information they needed.

Satisfaction with the flood warning service: Levels of satisfaction among those for whom flood warnings were/should have been provided.

Damage Reduction: The amount of flood damage saved by the warning.

Protection of life and limb: The assessed number of lives and injuries avoided by the warning.

Benefit–cost ratio: The ratio of the assessed benefits and costs of providing a flood warning.

Some of the reviewed projects evaluated the EWS performance, considering only technical aspects. However, after their implementation, they did not register the level of acceptance by the community at risk or the damage reduction.

The information obtained from this review study was applied to the development of an early warning system for detection in real-time of urban pluvial flooding hazard levels in an ungauged basin in Barranquilla, Colombia [23]. This design used the structure suggested in this study for the selection and installation of the main and complementary elements to measure in real-time the hydro-meteorological variables that influence the formation of urban flash floods. It also considered the types of sensors for measuring the water level and water velocity and the power supply system. Figure 9 illustrates the set of a water level sensor, a rain gauge, a gateway, and a photovoltaic and communication system for this project.

This project developed a Web application considering the recommendations about the diffusion of information. The aim was to generate an effective and timely response from the population during flash floods. The information was updated every 5 min with the received precipitation value.



Figure 9. Monitoring, Communication and Power supply system of an EWS for urban flash floods in Barranquilla (Colombia)

The application offers the option to subscribe to receive notifications during rainy events through the social networks Twitter and Telegram. Likewise, it allows the addition of more streams as well as the inclusion of as many observation points and rain gauges. In the future, it will display the atmospheric information obtained by different sensors. Figure 10 shows the Web application interface.

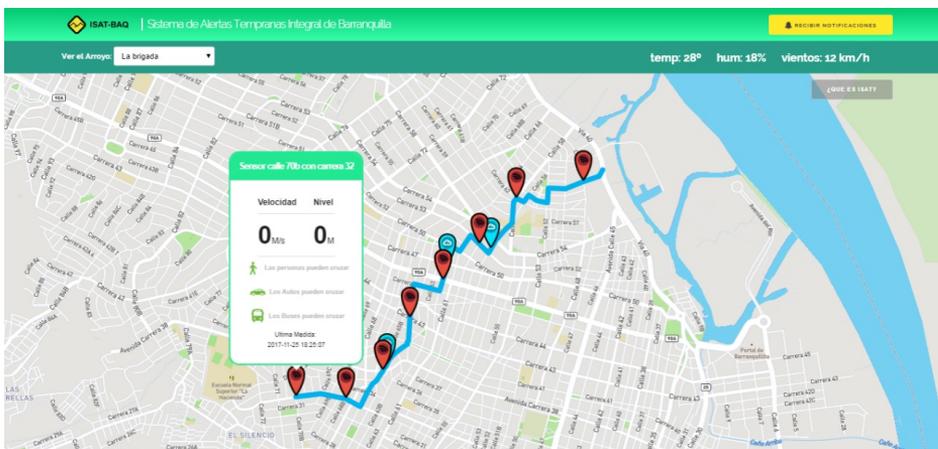


Figure 10. Web application (<http://www.isatbaq.com.co>).

6. Conclusions

The effects of climate change have become evident in the increased formation of natural phenomena that can adversely affect people's lives [94]. The increasing intensity and duration of rainfall in urban areas makes them more prone to flash floods, as the capacity of drainage systems is saturated, placing city inhabitants at risk and causing material losses. Flash floods, unlike other floods, are of very fast onset, with a relatively short spike and rapid withdrawal [94]. Therefore, it is necessary to design adequate and intelligent adaptation measures to reduce the negative impact on society.

EWS has been established worldwide as a useful tool for populations to adapt and mitigate the impact of flash floods in urban areas. Through this review, the basic architecture of EWS for flash floods in urban areas was determined. This EWS is people-centred and the community can have an active participation from design to implementation. The EWS is divided into four structures: Disaster Risk Knowledge, Forecasting, Dissemination and Communication of information and Preparedness and Response.

Through this review, it was identified that the variables that must be monitored in real time during the rain events are the amount of rain and water level. The information of these variables is also processed in real time to issue alerts in a timely manner. Rain gauges, weather radars, ultrasonic and pressure sensors were the instruments implemented to measure these variables. Although weather radars have more coverage than rain gauges, they are more expensive and need more technical requirements for their implementation.

Since flash flood stream flow is turbulent and can wash away different objects in its path, the use of submersible sensors such as pressure sensors is not recommended. Therefore, ultrasonic or radar sensors are more suitable for flooring applications.

To send the sensor data measurements to a data centre, the reviewed projects used wireless communication systems; GPRS modules and wireless modules under 802.15 standard were the most used. GPRS modules have a better range of coverage than other wireless communication protocols; nevertheless, they have higher power consumption and longer transmission time.

This article has shown that not all the reviewed projects fully comply with the suggested norms for an effective early warning system. This article serves as a guide for the design of early warning systems for pluvial flash floods that affect urban areas, taking into account the instruments, protocols and primary and secondary means for the forecasting and alert dissemination process.

Funding: Administrative Department of Science, Technology and Innovation of the presidency of the Republic of Colombia (COLCIENCIAS) #728.

Acknowledgments: This project was developed in collaboration with the Institute for Molecular Imaging Instrumentation (I3M) of Polytechnic University of Valencia, Spain, in the area of Electronic Systems Design.

Conflicts of Interest: The authors declare no conflict of interest. The founding sponsors had no role in the design of the study; in the collection, analyses, or interpretation of data; in the writing of the manuscript, and in the decision to publish the results.

References

1. Kundzewicz, Z.W. Non-structural flood protection and sustainability. *Water Int.* **2002**, *27*, 3–13.
2. Singh, P.; Sinha, V.S.P.; Vijhani, A.; Pahuja, N. Vulnerability assessment of urban road network from urban flood. *Int. J. Disaster Risk Reduct.* **2018**, *28*, 237–250.
3. Birkmann, J.; von Teichman, K. Integrating disaster risk reduction and climate change adaptation: Key challenges—Scales, knowledge, and norms. *Sustain. Sci.* **2010**, *5*, 171–184.
4. International Strategy for Disaster Reduction (ISDR). Emerging Challenges for Early Warning Systems in context of Climate Change and Urbanization. Available online: http://www.preventionweb.net/files/15689_ewsincontextofccandurbanization.pdf (accessed on 9 August 2017).
5. Chaumillon, E.; Bertin, X.; Fortunato, A.B.; Bajo, M.; Schneider, J.-C.; Dezileau, L.; Walsh, J.P.; Michelot, A.; Chauveau, E.; Créach, A.; et al. Storm-induced marine flooding: Lessons from a multidisciplinary approach. *Earth Sci. Rev.* **2017**, *165*, 151–184.
6. The University Corporation for Atmospheric Research. *Flash Flood Early Warning System Reference Guide*; The University Corporation for Atmospheric Research: Boulder, CO, USA, 2010.
7. National Weather Service. Flood Safety Awareness Week: Flood Hazards. 2017. Available online: <http://www.weather.gov/aly/fldsafetyWednesday> (accessed on 7 July 2017).
8. Ministère de l'Écologie and du Développement Durable et de l'Énergie. *Submersion Marine*; Ministère de l'Écologie and du Développement Durable et de l'Énergie: Paris, France, 2016.
9. The World Bank; Jha, A.K.; Bloch, R.; Lamond, J. *Cities and Flooding A Guide to Integrated Urban Flood Risk Management for the 21st Century*; The World Bank: Washington, DC, USA, 2012.
10. Alfieri, L.; Cohen, S.; Galantowicz, J.; Schumann, G.J.-P.; Trigg, M.A.; Zsoter, E.; Prudhomme, C.; Kruczkiewicz, A.; de Perez, E.C.; Flamig, Z.; et al. A global network for operational flood risk reduction. *Environ. Sci. Policy* **2018**, *84*,

149–158.

11. Maggioni, V.; Massari, C. On the performance of satellite precipitation products in riverine flood modeling: A review. *J. Hydrol.* **2018**, *558*, 214–224.
12. Da Cruz Simoes, N.E. *Urban Pluvial Flood Forecasting*; Imperial College London: London, UK, 2012.
13. Jiang, Y.; Zevenbergen, C.; Ma, Y. Urban pluvial flooding and stormwater management: A contemporary review of China's challenges and 'sponge cities' strategy. *Environ. Sci. Policy* **2018**, *80*, 132–143.
14. Ten Veldhuis, J.A.E. How the choice of flood damage metrics influences urban flood risk assessment. *J. Flood Risk Manag.* **2011**, *4*, 281–287.
15. World Meteorological Organization. Global Approach to Address Flash Floods. 2017. Available online: <http://www.hrc-lab.org/publicbenefit/downloads/wmo-flashflood.pdf> (accessed on 1 August 2017).
16. World Meteorological Organization. *Guidelines on Early Warning Systems and Application of Nowcasting and Warning Operations*; Pws-21, No. 1559; World Meteorological Organization: Geneva, Switzerland, 2010; p. 25.
17. Chen, Y.; Zhou, H.; Zhang, H.; Du, G.; Zhou, J. Urban flood risk warning under rapid urbanization. *Environ. Res.* **2015**, *139*, 3–10.
18. Intergovernmental Panel on Climate Change. *Climate Change 2014—Impacts, Adaptation and Vulnerability: Part B: Regional Aspects: Working Group II Contribution to the IPCC Fifth Assessment Report*; Cambridge University Press: Cambridge, UK, 2014; Volume 2.
19. European Commission and Water Group Floods (WGF). *Pluvial Flooding: An EU Overview*; European Commission and Water Group Floods (WGF): Berlin, Germany, 2016.
20. Guerreiro, S.B.; Glenis, V.; Dawson, R.J.; Kilsby, C. Pluvial Flooding in European Cities—A Continental Approach to Urban Flood Modelling. *Water* **2017**, *9*, 296.
21. Houston, D.; Werritty, A.; Bassett, D.; Geddes, A.; Hoolachan, A.; McMillan, M. *Pluvial (Rain-Related) Flooding in Urban Areas: The Invisible Hazard*; JRF: London, UK, 2011.
22. Bhattarai, R.; Yoshimura, K.; Seto, S.; Nakamura, S.; Oki, T. Statistical model for economic damage from pluvial floods in Japan using rainfall data and socioeconomic parameters. *Nat. Hazards Earth Syst. Sci.* **2016**, *16*, 1063–1077.
23. Acosta-Coll, M.; Ballester-Merelo, F.; Martinez-Peiró, M. Early warning system for detection of urban pluvial flooding hazard levels in an ungauged basin. *Nat. Hazards* **2018**, *92*, 1237–1265.
24. Zhang, W.; Li, S.M.; Shi, Z. Formation causes and coping strategies of urban rainstorm waterlogging in China. *J. Nat. Disasters* **2012**, *21*, 180–184.
25. Yin, J.; Ye, M.; Yin, Z.; Xu, S. A review of advances in urban flood risk analysis over China. *Stoch. Environ. Res. Risk Assess.* **2015**, *29*, 1063–1070.

26. Azam, M.; Kin, H.S.; Maeng, S.J. Development of flood alert application in Mushroom stream watershed Korea. *Int. J. Disaster Risk Reduct.* **2017**, *21*, 11–26.
27. Creutin, J.D.; Borga, M.; Grunfest, E.; Lutoff, C.; Zocatelli, D.; Ruin, I. A space and time framework for analyzing human anticipation of flash floods. *J. Hydrol.* **2013**, *482*, 14–24.
28. Yin, J.; Yu, D.; Yin, Z.; Liu, M.; He, Q. Evaluating the impact and risk of pluvial flash flood on intra-urban road network: A case study in the city center of Shanghai, China. *J. Hydrol.* **2016**, *537*, 138–145.
29. International Strategy for Disaster Reduction (ISDR). UNISDR Terminology on Disaster Risk Reduction. Available online: <https://www.unisdr.org/we/inform/publications/657> (accessed on 24 July 2017).
30. Einfalt, T.; Hatzfeld, F.; Wagner, A.; Seltmann, J.; Castro, D.; Frerichs, S. URBAS: Forecasting and management of flash floods in urban areas. *Urban Water J.* **2009**, *6*, 369–374.
31. Lam, R.; Leung, L.P.; Balsari, S.; Hsiao, K.-H.; Newnham, E.; Patrick, K.; Pham, P.; Leaning, J. Urban disaster preparedness of Hong Kong residents: A territory-wide survey. *Int. J. Disaster Risk Reduct.* **2017**, *23*, 62–69.
32. United Nations Environment Programme; Grasso, V.; Singh, A.; Pathak, J. *Early Warning Systems a State of the Art Analysis and Future Directions*; United Nations Environment Programme: Nairobi, Kenya, 2012.
33. Bouwer, L.; Papyrakis, E.; Poussin, J.; Pfuertscheller, C.; Thieken, A. The costing of measures for natural hazard mitigation in Europe. *Nat. Hazards Rev.* **2014**, *15*. DOI: 10.1061/(ASCE)NH.1527-6996.0000133
34. Praskievicz, S.; Chang, H. A review of hydrological modelling of basin-scale climate change and urban development impacts. *Prog. Phys. Geogr.* **2009**, *33*, 650–671.
35. Hunt, A.; Watkiss, P. Climate change impacts and adaptation in cities: A review of the literature. *Clim. Chang.* **2011**, *104*, 13–49.
36. Kundzewicz, Z.W.; Kanae, S.; Seneviratne, S.I. Flood risk and climate change: Global and regional perspectives. *Hydrol. Sci. J.* **2013**, *59*, 1–28.
37. You, Q.; Kang, S.; Aguilar, E. Changes in daily climate extremes in China and their connection to the large scale atmospheric circulation during 1961–2003. *Clim. Dyn.* **2011**, *36*, 2399–2417.
38. Ding, Y.H.; Ren, G.Y.; Shi, G.Y. National assessment report of climate change (I): Climate change in China and its future trend. *Adv. Clim. Chang. Res.* **2016**, *2*, 3–8.
39. Liu, Z.; Xia, J. Impact of climate change on flood disaster risk in China. *Chin. J. Nat.* **2016**, *3*, 177–181.
40. ONS (Office for National Statistics). Population Projections: 2014-Based Statistical Bulletin. 2014. Available online: <https://www.ons.gov.uk/peoplepopulationandcommunity/populationandmigration/population-projections/bulletins/nationalpopulationprojections/2015-10-29>

(accessed on 15 June 2018).

41. National Bureau of Statistics of China (NBSC). *China Statistical Yearbook 2016*; National Bureau of Statistics Press: Beijing, China, 2016.
42. Miller, J.D.; Hutchins, M. The impacts of urbanisation and climate change on urban flooding and urban water quality: A review of the evidence concerning the United Kingdom. *J. Hydrol. Reg. Stud.* **2017**, *12*, 345–362.
43. Borga, M.; Anagnostou, E.N.; Blöschl, G.; Creutin, J.D. Flash flood forecasting, warning and risk management: The HYDRATE project. *Environ. Sci. Policy* **2011**, *14*, 834–844.
44. Grillakis, M.G.; Koutroulis, A.G.; Komma, J.; Tsanis, I.K.; Wagner, W.; Blöschl, G. Initial soil moisture effects on flash flood generation—A comparison between basins of contrasting hydro-climatic conditions. *J. Hydrol.* **2016**, *541*, 206–2017.
45. Zhang, J.; Yu, Z.; Yu, T.; Si, J.; Feng, Q.; Cao, S. Transforming flash floods into resources in arid China. *Land Use Policy* **2018**, *76*, 746–753.
46. United Nations Office for Disaster Risk Reduction (UNISDR). *Living with Risk a Global Review of Disaster Reduction Initiatives*, 2004th ed.; United Nations Publications: New York, NY, USA, 2004.
47. Spiekermann, R.; Kienberger, S.; Norton, J.; Briones, F.; Weichselgartner, J. The Disaster-Knowledge Matrix—Reframing and evaluating the knowledge challenges in disaster risk reduction. *Int. J. Disaster Risk Reduct.* **2015**, *13*, 96–108.
48. Weichselgartner, J.; Pigeon, P. The Role of Knowledge in Disaster Risk Reduction. *Int. J. Disaster Risk Sci.* **2015**, *6*, 107–116.
49. Hunt, D.P. The concept of knowledge and how to measure it. *J. Intellect. Cap.* **2003**, *4*, 100–113.
50. United Nations Development Programme. *Energy and the Challenge of Sustainability*; United Nations Development Programme: New York, NY, USA, 2000.
51. The Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC). *Managing the Risks of Extreme Events and Disasters to Advance Climate Change Adaptation. Special Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*; Cambridge University Press: New York, NY, USA, 2012.
52. United Nations Development Programme (UNDP) and Regional Crisis Prevention and Recovery Programme. *Strengthening Capacities for Disaster Risk Reduction, A Primer*. 2008. Available online: https://www.preventionweb.net/files/globalplatform/entry_bg_paper~strengtheningcapacityfordrprimerfullreport.pdf (accessed on 30 August 2017).
53. Unidad Nacional Para la Gestión del Riesgo de Desastres and Programa de las Naciones Unidas Para el Desarrollo. UNGRD, PNUD. *Guía Metodológica Para la Elaboración de Planes Departamentales Para la Gestión del Riesgo*. 2012. Available online: <http://repositorio.gestiondelriesgo.gov.co/handle/20.500.11762/20871?show=full> (accessed on 3 August 2017).

54. Surjan, A.; Sharma, A.; Shaw, R. Understandig Urban resilience. In *Community, Environment and Disaster Risk Management*; Shaw, A.S.R., Ed.; Emerald: Bingley, UK, 2011; pp. 17–45.
55. International Strategy for Disaster Reduction (ISDR) and German Committee for Disaster Reduction. Developing Early Warning Systems: A Checklist. In *Proceedings of the Third International Conference on Early Warning (EWC III)*, Bonn, Germany, 27–29 March 2006; pp. 1–13.
56. Fakhruddin, S.H.M.; Kawasaki, A.; Babel, M.S. Community responses to flood early warning system: Case study in Kaijuri Union, Bangladesh. *Int. J. Disaster Risk Reduct.* **2015**, *14*, 323–331.
57. Balis, B.; Kasztelnik, M.; Bubak, M.; Bartynski, T.; Gubał, T.; Nowakowski, P.; Broekhuijsen, J. The UrbanFlood common information space for early warning systems. *Procedia Comput. Sci.* **2011**, *4*, 96–105.
58. Krzhizhanovskaya, V.V.; Shirshov, G.S.; Melnikova, N.B.; Belleman, R.G.; Rusadi, F.I.; Broekhuijsen, B.J.; Gouldby, B.P.; Lhomme, J.; Balis, B.; Bubak, M.; et al. Flood early warning system: Design, implementation and computational modules. *Procedia Comput. Sci.* **2011**, *4*, 106–115.
59. Chang, C.L.-H.; Lin, T.-C. The role of organizational culture in the knowledge management process. *J. Knowl. Manag.* **2015**, *19*, 433–455.
60. Mark, O.; Weesakul, S.; Apirumanekul, C.; Boonya-Aroonnet, S.; Djordjevic, S. “Potential and limitations of 1D modelling of urban flooding,” *J. Hydrol.* **2004**, vol. 299, p. 284–299.
61. Henonin, J.; Russo, B.; Mark, O.; Gourbesville, P. Real-time urban flood forecasting and modelling—A state of the art. *J. Hydroinform.* **2013**, *15*, 717.
62. Mayhorn, C.; Collins, A. Warning the world of extreme events: A global perspective on risk communication for natural and technological disaster. *Saf. Sci.* **2014**, *61*, 43–50.
63. Cools, J.; Innocenti, D.; O’Brien, S. Lessons from flood early warning systems. *Environ. Sci. Policy* **2016**, *58*, 117–122.
64. Plate, E.J. Early warning and flood forecasting for large rivers with the lower Mekong as example. *J. Hydro-Environ. Res.* **2007**, *1*, 80–94.
65. Nezih, A.; Green, W. OR/MS research in disaster operations management. *Eur. J. Oper. Res.* **2006**, *175*, 475–493.
66. Alfieri, L.; Burek, P.; Dutra, E.; Krzeminski, B.; Muraro, D.; Thielen, J.; Pappenberger, F. “GloFAS—global ensemble streamflow forecasting and flood early warning,” *Earth Syst. Sci.* **2013**, vol. 17, p. 1161–1175.
67. Morss, R.E.; Mulder, K.J.; Lazo, J.K.; Demuth, J.L. How do people perceive, understand, and anticipate responding to flash flood risks and warnings? Results from a public survey in Boulder, Colorado, USA. *J. Hydrol.* **2016**, *541*, 649–664.
68. Quevauiller, P.; Innocenti, D. When Science Meets Policy: Enhancing

Governance and Management of Disaster Risks. In *Hydrometeorological Hazards: Interfacing Science and Policy*; John Wiley & Sons: New York, NY, USA, 2014.

69. Chang, N.; Guo, D.-H. Urban flash flood monitoring, mapping and forecasting via a tailored sensor network system. In Proceedings of the 2006 IEEE International Conference Networking, Sensing Control, Fort Lauderdale, FL, USA, 23–25 April 2006; pp. 757–761.

70. UNGRD. Guía Metodológica Para la Elaboración de Planes de Departamentales Para la Gestión del Riesgo. Programa de Naciones Unidas Para el Desarrollo Colombia-UNGRD. COL/72959 PNUD-UNGRD, 2012. Available online: <http://repositorio.gestiondelriesgo.gov.co/handle/20.500.11762/20871> (accessed on 22 July 2017). (In Spanish)

71. Acosta-Coll, M. Sistemas de Alerta Temprana (S.A.T) para la Reducción del Riesgo de Inundaciones Súbitas y Fenómenos Atmosféricos en el Área Metropolitana de Barranquilla. *Sci. Tech.* **2013**, *18*, 303–308. (In Spanish)

72. Cama-Pinto, A.; Piñeres-Espitia, G.; Zamora-Musa, R.; Acosta-Coll, M.; Caicedo-Ortiz, J.; Sepúlveda-Ojeda, J. Design of a wireless sensor network for monitoring of flash floods in the city of Barranquilla, Colombia. *Rev. Chil. Ingeniare* **2016**, *24*, 581–599.

73. Ramírez-Cerpa, E.; Acosta-Coll, M.; Vélez-Zapata, J. Analysis of the climatic conditions for short-term precipitation in urban areas: A case study Barranquilla, Colombia. *Idesia* **2017**, *35*, 87–94.

74. Piñeres-Espitia, G.; Mejía-Neira, A. Plataformas tecnológicas aplicadas al monitoreo climático. *Prospectiva* **2013**, *11*, 78–87. (In Spanish)

75. Caicedo-Ortiz, J.G.; Acosta-Coll, M.A.; Cama-Pinto, A. Modelo de despliegue de una WSN para la medición de las variables climáticas que causan fuertes precipitaciones. *Prospectiva* **2015**, *13*, 106–115. (In Spanish)

76. Garcia, F.C.C.; Retamar, A.E.; Javier, J.C. A real time urban flood monitoring system for metro Manila. In Proceedings of the IEEE Region 10 Conference Annual International Conference Proceedings/TENCON, Singapore, 22–25 November 2016; pp. 3–7.

77. Sunkpho, J.; Ootamakorn, C. Real-time flood monitoring and warning system. *Songklanakarín J. Sci. Technol.* **2011**, *33*, 227–235.

78. Acosta-Coll, M. Radares Meteorológicos de Bajo Costo para la Detección de Precipitación y Desarrollo de Operaciones Aéreas en Colombia. *Rev. Colomb. Tecnol. Av.* **2013**, *2*, 111–116. (In Spanish)

79. Acosta-Coll, M. *Métodos de Eliminación de ecos Fijos y la Integración de los datos de una red de Radares Meteorológicos Banda-X en Terrenos Complejos*; University of Puerto Rico Mayagüez Campus: Mayagüez, Puerto Rico, 2011. (In Spanish)

80. Torres-Molina, L. *Flood Alert System Using Rainfall Data in the Mayagüez Bay Drainage Basin, Western Puerto Rico*; University of Puerto Rico Mayagüez Campus: Mayagüez, Puerto Rico, 2014.

81. Marshall, J.S.; Palmer, W.M. The distribution of raindrops with size. *J. Meteor.* **1948**, *5*, 165–166.
82. Llord, X.; Sánchez-diezma, R.; Rodríguez, A.; Sancho, D.; Berenguer, M.; Sempere-torres, D. Floodalert: A simplified radar-based ews for urban flood warning. In Proceedings of the 11th International Conference on Hydroinformatics HIC, New York, NY, USA, 17–21 August 2014.
83. World Meteorological Organization (WMO). *Guide to Meteorological Instruments and Methods of Observation: (CIMO Guide)*, Geneva **2014**; Chairperson, Publications Board.
84. Colom, J.G.; Cruz-Pol, S.; Pablos, G.; Trabal, J.M. UPRM Weather Radars at the Central American and Caribbean Games at Mayagüez. *IEEE Geosci. Remote Sens. Soc. Newsl.* **2010**, *156*, 34–39.
85. Texas Instruments. Liquid-Level Monitoring Using a Pressure Sensor. 2011. Available online: <http://www.ti.com/lit/an/snaa127/snaa127.pdf> (accessed on 1 May 2017).
86. Flow Line Options Corp. Ultrasonic Transmitters vs. Guided Wave Radar for Level Measurement. 2010. Available online: https://www.flo-corp.com/wp-content/uploads/2017/01/LTT1_UltrasonicTransmitters_GuidedWaveRadar_LevelMeasurement_whitepaper.pdf (accessed on 2 May 2017).
87. Koval, L.; Vaňuš, J.; Bilik, P. Distance Measuring by Ultrasonic Sensor. In *IFAC (International Federation of Automatic Control)*; IFAC: Zurich, Switzerland, 2016; pp. 153–158.
88. Panda, K.G.; Agrawal, D.; Nshimiyimana, A.; Hossain, A. Effects of environment on accuracy of ultrasonic sensor operates in millimetre range. *Perspect. Sci.* **2016**, *8*, 574–576.
89. Stănescu, T.; Moldovan, E.C.; Dolga, V. Effects of the Environment Temperature on the Characteristic of Parallax PING Ultrasonic Sensor. *Robot. Manag.* **2014**, *19*, 39–44.
90. Saad, C.; Mostafa, B.; Cheikh, E.A.; Abderrahmane, H. Comparative Performance Analysis of Wireless Communication Protocols for Intelligent Sensors and Their Applications. *Int. J. Adv. Comput. Sci. Appl.* **2014**, *5*. DOI : 10.14569/IJACSA.2014.050413.
91. Lee, J.-S.; Su, Y.-W.; Shen, C.-C. A Comparative Study of Wireless Protocols: Bluetooth, UWB, ZigBee, and Wi-Fi. In Proceedings of the IECON 2007 33rd Annual Conference of the IEEE Industrial Electronics Society, Taipei, Taiwan, 5–8 November 2007.
92. Vrije Universiteit Brussel—Department of Hydrology and Hydraulic Engineering. FloodCitiSense: Early Warning Service for Urban Pluvial Floods for and by Citizens and City Authorities. 2017. Available online: <http://www.iiasa.ac.at/web/home/research/researchPrograms/EcosystemsServicesandManagement/FloodCitiSense.html> (accessed on 19 June 2018).
93. Parker, D.J. Flood Warning Systems and Their Performance. In *Oxford*

Research Encyclopedia of Natural Hazard Science, 2017. Available online: <http://naturalhazardscience.oxfordre.com/view/10.1093/acrefore/9780199389407.001.0001/acrefore-9780199389407-e-84> (accessed on 19 June 2018).

94. Rapant, P.; Inspektor, T. Early warning of flash floods based on the weather radar. In Proceedings of the 2015 16th International Carpathian Control Conference (ICCC), Szilvasvarad, Hungary, 27–30 May 2015.



© 2018 by the authors. Submitted for possible open access publication under the terms and conditions of the Creative Commons Attribution (CC BY) license

(<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>).

D. Artículo 2

EARLY WARNING SYSTEM FOR DETECTION OF URBAN PLUVIAL FLOODING HAZARD LEVELS IN AN UNGAUGED BASIN

Acosta-Coll, Melisa¹²

Ballester-Merelo, Francisco J.²

Martínez-Peiró, Marcos²

Abstract

Prolonged and high intensity rainfall often saturates urban drainage systems and generates urban pluvial flooding, resulting in hazardous flash floods. The city most affected by urban flooding in Colombia (South America) is Barranquilla since lacks a proper storm water drainage system. Heavy rainfall produces flash floods to quickly become torrential streams that flow down the streets endangering pedestrians. This research describes a low-cost early warning system

Melisa Acosta-Coll
macosta10@cuc.edu.co

¹ Department of Electronic Engineering, Universidad de la Costa CUC (Barranquilla, Colombia)

² Department of Electronic Engineering, Universidad Politécnica de Valencia (Valencia, Spain)

(EWS) to detect in real time the hazard level of a stream in an ungauged basin. The EWS indicates whether it is safe or not for pedestrians to cross a flooded street, based on certain criteria used to assess the hazard level of the torrent. A hydrological and hydraulic model calculates the flow, velocity and water level in all cross sections along the stream. The model uses only real-time measurements of rain gauges and topographic survey data to determine the hazard level. Finally, a wireless sensor network sends the alert to a web platform and warns the community in real time.

Keywords:

Early warning system; flash floods; hydrological model; hydraulic model; pluvial flooding; urban drainage.

1. Introduction

Flash floods are phenomena that take place in basins of up to hundred square kilometers as a result of heavy rainfall (Borga et al. 2007). Man-made factors such as paved surfaces and reduced urban vegetation and green areas prevent the absorption of water and tend to increase runoff levels during storms (Sunkphoand Ootamakorn 2011) (UCAR 2010). Flash floods have negative impacts on the life, work, business, education and infrastructure of the population and it is one of the most deadly hydro-meteorological risks (Archer and Fowler 2015). To minimize the damage resulting from flash floods, in terms of fatality and injury rates, it is necessary first to identify the main causative factors and then to establish strategies to mitigate their impact on humans (Spitalar et al 2014).

During high intensity rainfall, the sewage system and drainage canals are not capable of draining away all the water in short periods and generates urban flooding (Benzerra et al. 2012). This type of flooding has less economic and human consequences than coastal and river floods, but it is more frequent (Östberg et al. 2012) (Cherqui et al. 2015).

Colombia has two main seasons characterized mostly by the amount of rainfall, rather than changes in temperature, In the Colombian Caribbean region the dry

season is from December to March, while the rest of the year is mostly rainy. The city of Barranquilla is the main economic center of the Colombian Caribbean region and the fourth most populous city in the country (PNUD 2012). But during the rainy season urban flooding severely affects the city, as some streets become torrential streams that disrupt daily life, blocking roads and creating chaos in public transportation. The authorities have implemented some measures to adapt to the flood flows, such as warning signage for the most hazardous streams. In recent years, public works have been undertaken to some of the most dangerous streams, which is a high-cost and long-term structural solution to mitigate the problem, however, the city is experiencing rapid urban growth with construction of new roads, urbanization of previously vacant lands and the reduction of green areas, all of which lead to the development of new drains and impermeable surfaces.

Early warning systems (EWS) are widely used tools to manage urban flooding disasters and to prepare disaster response strategies (UNGR 2012). The aim of an EWS is to protect human lives and minimize damages from an expected threat. An EWS involves a series of related and inter-connected components: forecasting, translating forecast information into warnings and transmitting the warnings to authorities and the community (Yang et. al.2014) (Douglas et. al. 2010). An EWS can be highly relevant to the community when departmental and city authorities agree to treat it as a cross-cutting issue of special importance, and when the community is involved in the process, which helps enhance knowledge, responsiveness to disasters and timely decision making (Tingsanchali 2011). Likewise, in the framework of disaster risk management, it is the responsibility of local authorities to prepare the community for decision making [65]

This paper presents the structure of a low-cost EWS that detects hazard levels in real time for a stream for which no historical data is available. The aim of this EWS is to warn the community of the danger of being swept away by the stream during heavy rainfall episodes. First, we establish the criteria to determine hazard levels for pedestrians and we select the hydrological and hydraulic variables to be used for forecasting. Then a hydrological and hydraulic model is developed to calculate the selected hydrological and hydraulic variables and compare them

with reference values. Lastly, a description of the network architecture for transmitting the alerts is presented.

2. Hazard level criteria

The top priority during a heavy rainfall episode is to protect people's lives. In addition, it is necessary to provide an efficient drainage system to prevent the flooding of properties and interruptions of vehicular traffic (UDFCD 1969). The morphological characteristics of the channel and hydraulic parameters, such as water level, water velocity and combined effect, are responsible for the loss of stability of pedestrians when trying to cross hazardous streams and may be washed away with potential injuries and fatalities. If these parameters exceed the safety levels, an alarm system must warn the community about the imminent danger. Currently, there are few references of projects that define the hazard levels of urban flooding for pedestrians, or even discussions on criteria to establish such thresholds.

Gómez (2007) describes two types of criteria to determine the hazard level of a stream for pedestrian. The first criterion is the maximum allowable water level in the streets before the water begins to spill into buildings and homes. Table 1 illustrates the criteria in this group.

Table 4 Criteria for maximum allowable water level in streets

Source	Reference	y_{max} (m)	Description
Urban Storm Drainage Criteria Manual. Urban Drainage and Flood Control District. Denver, Colorado (USA)	(UDFCD 1969)	0.45	Applied to urban areas. Buildings that lie below this value (0.45 m), should take protective measures for flooding
Road Drainage Manual, National Transport Commission (Republic of South Africa)	(Roosebom A. et al. 1986)	0.3-0.7	Applied to rural areas

Clark County	(CCRFCD (Clark County Regional Flood Control District 1999)	0.3	Applied to urban areas. It establishes that the allowable water level on local streets with widths of less than 24 m is 0.3 m
Mendoza	(Nania 1999)	0.3	Applied to urban areas

The second set of criteria consider the combined action of water level and velocity. Table 2 summarizes the criteria that define flood hazard zones taking into consideration the maximum allowable values for water level, velocity and the combination of both parameters.

Table 5 Criteria considering the combined action of water level and velocity

Source	Reference	y_{max} (m)	v_{max} (m.s ⁻¹)	vy (m ² .s ⁻¹)
Human Stability in a High Flood Hazard Zone. AWRA Water Resources Bulletin. (USA)	(Abt et al. 1989)	1.2	3.05	$0.71 \leq v.y \leq 2.13$
Clark County Regional Flood Control District (CCRFCD). Hydrological criteria and drainage design	(Clark County Regional Flood Control District (CCRFCD) 1999)	0.3	-	$v.y \leq 0.55$

manual. Clark County (USA)				
Control de desarrollo urbano en las zonas inundables (España)	(Témez 1992)	1	1	$vy \leq 0.5$
Curso de Hidrología Urbana Universitat Politècnica de Catalunya	(Gómez 2008)	-	-	$v.y \leq 0.45$
Russo doctoral thesis. Universitat Politecnica de Catalunya	(Russo 2009)	0.16	1.88	$vy = 0.22$
Experimental study of the stability of pedestrians exposed to urban pluvial flooding	(Martínez-Gomariz et al. 2016)	-	-	$vy \geq 0.22$

In the above table, the last row (Martinez-Gomariz et al. 2016) sets the strictest threshold for pedestrians exposed to hazardous water flows. This is the level we have selected for the EWS described in this paper. If the product of velocity times water level exceeds the threshold of $0.22 \text{ m}^2/\text{s}$ at a given observation point, it is then dangerous to cross it.

Martínez-Gomariz, Gómez, and Russo (2016) determined the hazard level criterion by setting up an experiment. A physical model of a typical urban street cross-section was constructed with a width of 1.6 m, a fixed 2% transverse slope and longitudinal slopes that vary from 0 to 10%. In addition, the physical model introduced a curb with maximum depth of 15 cm, as specified in the most common urban codes. Likewise, the model used a sidewalk to street interface to evaluate the stability of pedestrians when taking the first step from the sidewalk into the flooded street. Fig. 1 depicts the physical model.



Fig. 1 Physical Model (Martínez et al. 2016)

In this model, the activation of a series of three pumps generated different flows. Pumping capacity varied from 105.49 l/s up to 544.84 l/s when all three pumps were activated. An Acoustic Doppler Velocimetry (ADV) device measured five velocity profiles across the model of the testing section. Those five profiles were applied for sixteen flow scenarios resulting from the combination of 4, 6, 8 and 10 % slopes and 300, 375, 450 and 550 l/s discharges.

The experiment used 26 people: 16 women, 5 men and 5 children. Their ages ranged from 6 to 55, with weights from 37 to 71 kg and heights from 1.32 to 1.73 m. The test was carried out using the protocol established in Russo (2009) and the classification of hazard level was based on the following criteria:

- High hazard: The tested subject lost stability completely.

- Medium hazard: The tested subject displayed a great deal of difficulty in completing the protocol.
- Low hazard: Small or non-estimable instabilities were observed.

Based on the results for the high hazard level, the hazard threshold for pedestrians is the product of $v_y = 0.22 \text{ m}^2/\text{s}$. This value is lower than other criteria used to evaluate the stability for pedestrians exposed to water flows in urban areas. Fig. 2 illustrates the threshold for the classification of hazard level and the stable zone for pedestrians found by (Martínez-Gomarizi et al. 2016)

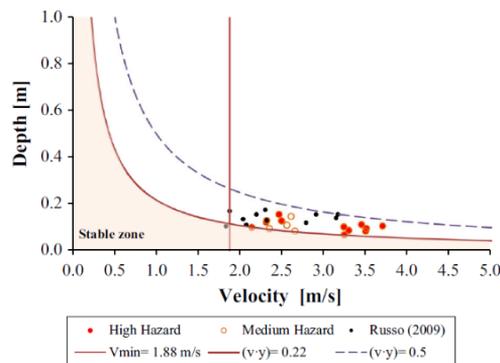


Fig. 2 Hazard level ($v_y = 0.22 \text{ m}^2/\text{s}$) and the stable zone for pedestrians (Martínez et al. 2016)

The hydrological and hydraulic properties of the streets are based on an artificial open channel whose primary coating material is concrete.

In the city of Barranquilla the streams have not only swept away people who try to cross the street but vehicles whose drivers defy the stream force, not knowing the danger. The variables involved establishing the loss of the vehicles stability exposed to dangerous streams is similar to the established one for the pedestrians. In addition to the hydraulic variables of the canal, such as the water level and velocity, it is necessary to take into account the physical characteristics of the vehicle such as weight, shape and design [24].

In order to provide a tool for decision making for drivers exposed to urban floods, Martínez-Gomaris et. al (2017) carried out an experimental campaign to obtain a general method to define the stable area in the flow depth domain for any vehicle.

This campaign included a range of twelve car models with different scales (1:14, 1:18 and 1:24). This study established the pair values of water depth-velocity relation v^*y (m^2/s) for each model. Table 3 shows the car classification and the relation v^*y (m^2/s) using the United States National Highway Traffic Safety Administration (NHTSA) criteria that separates vehicles into classes by the curb weight.

Table 6 Car classification and depth-velocity relation

Car type	(v*y) (m²/s)
Mini, light and compact	0.49-0.64
Medium	0.65-0.68
Heavy, Sport utility vehicles (SUV), Pickup trucks (PU), Vans	>0.69

The reaction time a driver needs to make a timely decision regarding the danger of a stream is greater than a pedestrian, therefore, the most restrictive hazard criterion of 0.22 m²/s explained above will be taken as a safety measure for both pedestrians and vehicles.

3. Hydrological-Hydraulic models

Hydrological and hydraulic models are approximations to a real system that enable studying the way the system operates and to predict its outcome, based on inputs and outputs of hydro-meteorological variables (Chow et. al 1994). During high rainfall, several hazardous streams flow along some urban stream channels rises to hazardous depths in the city of Barranquilla, located at the following coordinates: 10°57'42" N latitude and 74°46'54" W longitude. One of them is the stream named "La Carrera 65" which is 4.55 km long, and its associated basin area is 7.4 km² (Fig. 3).



Fig. 3 Basin and stream path of “La Carrera 65” stream

A topographic survey was carried out on the route from the beginning of the stream to its mouth in the large Magdalena river, which floods the properties of the city’s Naval School of Sub-officers. This topographic survey provides cross-sectional information for sections measured every 50 linear meters. Fig. 4 shows the longitudinal profile of the stream, which has an average slope of 1.8% with respect to the highest and lowest levels.

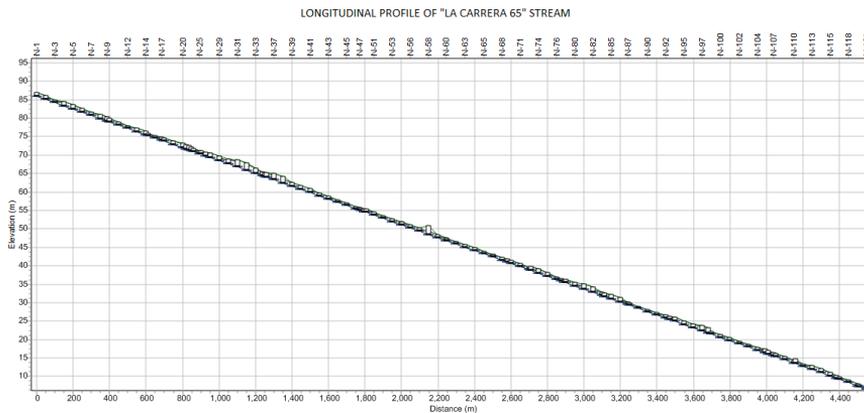


Fig. 4 Longitudinal profile of “La Carrera 65” stream

The aim of the developed model is to calculate the velocity and water level at each cross section of the stream, considering that these variables are used to measure the hazard level. The model uses a small number of devices and does not need historical data, which implies that it can be used in ungauged basins, as is

the case for most urban basins. The model uses the information of three rain gauges deployed at three different points along the stream's path (Fig. 5). A photovoltaic system supplies power to the gateway that collects the rain gauge data and a GPRS module sends the collected data in real-time to the web server. Since there is no historical data on water flows, levels and velocity, three level sensors with radar technology were installed to measure water levels at the same locations as the rain gauges. The set of water level sensor, rain gauge, gateway, and photovoltaic and communication system is called a NODE. These nodes are located on electricity poles in a manner that fulfills minimum safety distances for power distribution and recommendations given by the network operator. Figure 5 illustrates a node on an electric power pole and Table 4 describes the electrical characteristics.

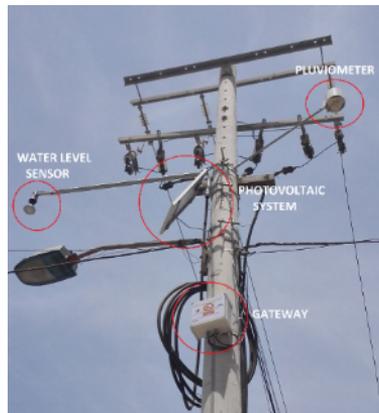


Fig. 5 Node on an electricity pole

Table 7 Node electrical characteristics

DEVICE	SUPPLY VOLTAGE	CURRENT CONSUMPTION
RAIN GAUGE	5 v	10.5 mA
MODEM GSM/GPRS RFIX - GSM 0901	5V	100mA – 2A
WATER LEVEL SENSOR	12V	14mA

GATEWAY GW-LP-01	Min. 4.5V max. 5.5V	5mA
------------------	---------------------	-----

The rain gauges are double tipping buckets with a resolution of 0.2 mm and precision of $\pm 4\%$. The temporal resolution is 5 minutes (Fig.6a). To avoid the effects of turbulence, debris flow and vehicular traffic, a radar level sensor that is not in contact with the flow was implemented. This type of sensor is specially designed for applications such as level measurement in water treatment systems, in pump stations as well as flow measurement and level control in open channels. The maximum measuring range is 15 m, resolution of 1 mm and temporal resolution of 2 minutes (Fig.6b).



Fig. 6 a) Double tipping bucket rain gauge sensor

b) Radar water level sensor

The hydrological-hydraulic model is divided into three sections:

- Estimation of effective rainfall and peak discharge
- Development of synthetic unit hydrograph
- Calculations of water velocity and water level.

2.1 Effective rainfall and peak discharge

The model uses the Soil Conservation Service (SCS) method, currently NRCS (National Resources Conservation Service) to estimate the effective rainfall (SCS 1985). The equation of effective rainfall or runoff is

$$Q = \frac{(P-0.2S)^2}{(P+0.8S)} \quad (1)$$

Where

Q = runoff (in)

P = rainfall precipitation (in)

S = potential maximum retention after runoff begins (in)

S depends to the soil and cover conditions of the watershed through the curved number (CN). CN has a range of 0 to 100, and S is related to CN by:

$$S = \frac{1000}{CN} - 10 \quad (2)$$

Some factors determine runoff CN such as the hydrologic soil group (HSG), cover type, treatment, hydrologic condition and the antecedent moisture condition. The hydrologic soil is classified into four categories (A, B, C, and D) according to runoff potential of bare soil after prolonged wetting: A (low runoff potential), B (Moderately low runoff potential), C (Moderately high runoff potential) and D (high runoff potential) (NRCS 2009).

The cover type and treatment of soil describe the type and condition of the vegetation cover. The hydrological condition refers to the capacity of the surface of the hydrographic basin to increase or prevent direct runoff. Good hydrologic conditions indicate that the soil usually has a low runoff potential for that specific hydrologic soil group, cover type and treatment. The antecedent moisture condition considers the recent history of precipitation and, consequently, is a measure of the amount stored by the basin (NRCS, 2009). For this project, the selected runoff curve number is 98 for normal moisture conditions in urban areas (NRCS, 2009). Using equation (1) and (2) and the selected CN , we calculate the effective rainfall Q .

The SCS synthetic unit hydrograph estimates the peak discharge (q_p) and flow time variation for effective rainfall Q (mm). The equation for q_p is:

$$q_p = 0.208 \frac{(A*Q)}{T_p} (m^3/s) \quad (3)$$

Where

q_p is the peak discharge (m^3/s)

A is the basin area (km^2)

T_p is the peak discharge time (hr)

$$T_p = 0.7T_c \quad (4)$$

T_c is the time of concentration, which is the time required for runoff to travel from the hydraulically most distant point in the watershed to the outlet. The SCS has defined T_c as:

$$T_c = \frac{\left(\frac{10}{6}\right)L^{0.8}(2540-22.86*CN)^{0.7}}{14104CN^{0.7}Y^{0.5}} \quad (5)$$

Where

L is the longest path along which water flows from the watershed divide to the outlet (m)

CN curve number

Y is the average watershed land slope (m/m)

With the peak discharge (q_p) value and peak discharge time (T_p) the time variation of the flow (q) was determined using the synthetic unit hydrograph of SCS.

In order to select the curve number, the study basin was divided into four sub-basins to determine the impervious zones. A previous work developed by Arrieta and Fernández (2015) determined the percentage of impervious zones for each sub-basin using the topographic survey and the information provided by the Geographic Institute Agustín Codazzi (IGAC) of Colombia, which regulates the availability and changes in the properties. The institute's website has a viewer with the cadastral map that shows the information of areas and lots built. The procedure performed to calculate the percentage of impermeability is described below.

Different polygons were selected from each sub-basin as shown in fig. 7



Fig. 7 Sub-basin polygons

1. Once the polygons were delimited, they were located in the IGAC viewer's plane and the area of the lot, the constructed area and the non-constructed area were determined. Fig. 8 shows the IGAC viewer.



Fig. 8 Cadastre viewer Geographic Institute Agustín Codazzi (IGAC)

2. Using the plane of the city, the area of the streets built with rigid concrete was determined.

3. Once obtaining the values of hard zones (streets and built area per lot) the summation is done, then this is subtracted to the non-built areas and the exact value of the impervious areas is obtained. Finally, this area is divided between the total area of the polygon, thus obtaining the percentage of hard areas.

3.2 Synthetic Unit Hydrograph

The Synthetic Unit hydrograph developed by the SCS, presently NRCS, determines the time distribution of the runoff (Chow 1994). This hydrograph, based on the analysis of a large number of watersheds, has a similar shape to that of most flood hydrographs (Fig. 9). The x-axis consists of dimensionless time units and y-axis of dimensionless discharge units (Chow 1994).

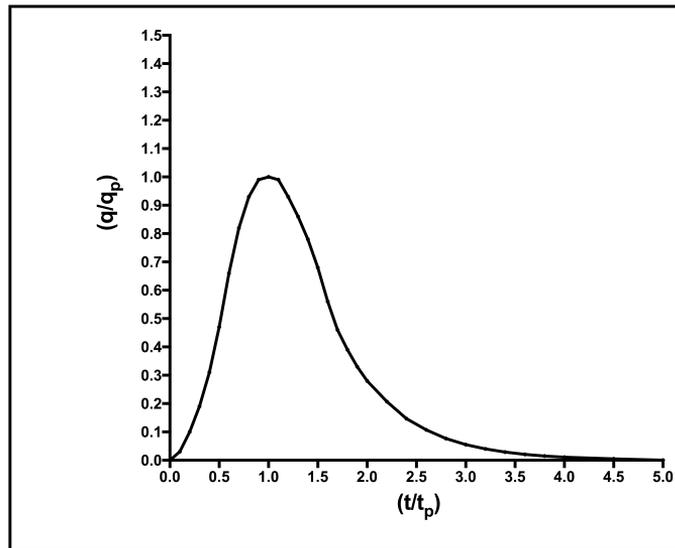


Fig. 9 SCS unit hydrograph

To find the abscissa of the hydrograph, the time ratio (t/t_p) is multiplied by the time to the peak (t_p); to find the ordinates of the hydrograph, the discharge ratio (q/q_p) is multiplied by the peak discharge (q_p). The value of q (m^3/s) indicates the time variation of flow during the rainfall event.

Since there are three rain gauges, the model takes the highest value of these and creates a hydrograph corresponding to the selected value. Figure 10 illustrates the

hydrographs corresponding to a rainfall event on September 17, 2015 with duration of 20 minutes and total precipitation of 11.4 mm, where t1 is the hydrograph of the first precipitation measurement starting at 0 min, t2 is the second registered precipitation starting 5 minutes after t1; t3 is the third, t4 is the last measurement and the total is the cumulative hydrograph of the rainfall event.

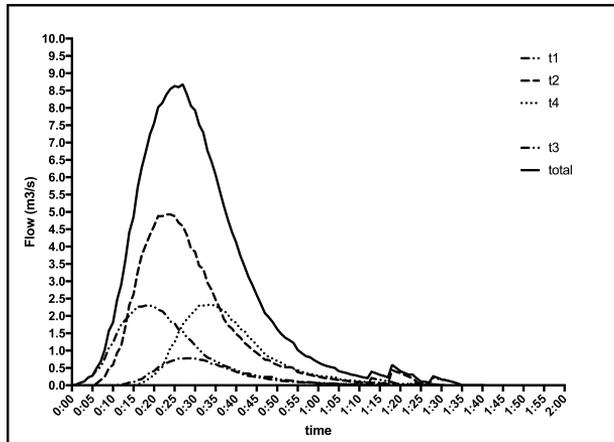


Fig. 10 Hydrographs of rainfall event

The next step is to create cumulative hydrographs. Figure 11 illustrates four cumulative hydrographs, where t1 is the hydrograph of the first precipitation measurement; c1 is the cumulative for t1 and t2; c2 is the cumulative for c1 and t3 and c3 is the cumulative for c2 and the last measurement t4

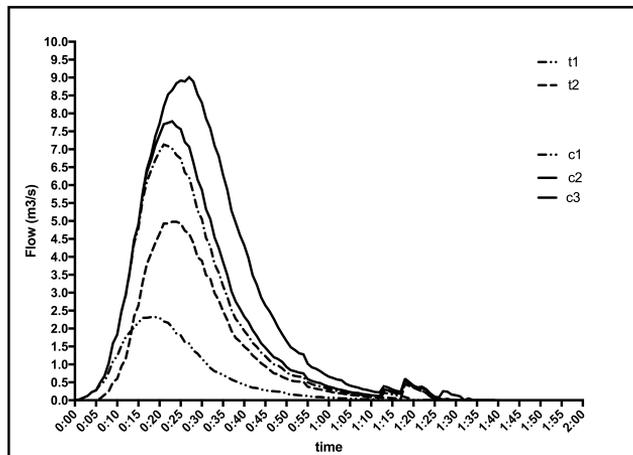


Fig. 11 Cumulative hydrographs

3.3 Calculation of water level and water velocity

The model uses the free hydraulic software HEC-RAS developed by Hydrologic Engineering Center of the US Army Corps of Engineers to perform the calculations of the water level and water velocity. Using information from the topographic survey as geometry data, the model performs a steady flow analysis with the first 15 flow measurements of the cumulative hydrographs. This predicts the hazard level for the next 15 minutes, because temporal resolution is one minute, but the model allows adjusting this time prediction for up to 3 hours later. Fig.12 illustrates the 15 first values of the hydrograph t1 and Fig.13 the boundary conditions applied upstream and downstream

Flow Change Location		Profile Names and Flow Rates															
River	Reach	RS	1 MN	2 MN	3 MN	4 MN	5 MN	6 MN	7 MN	8 MN	9 MN	10 MN	11 MN	12 MN	13 MN	14 MN	15 MN
ARROYO CALLE 61	SEGUNDA BRIGADA	120	0.02	0.07	0.12	0.23	0.28	0.44	0.53	0.79	1.09	1.23	1.53	1.76	1.9	2.04	2.16

Fig. 12 t1 flow values for steady flow data

River	Reach	Profile	Upstream	Downstream
ARROYO CALLE 61	SEGUNDA BRIGADA	all	Normal Depth S = 0.18	Normal Depth S = 0.018

Fig. 13 Boundary conditions upstream and downstream for steady flow

The profile output table (Fig.14) shows the time variation of water level, water velocity and flow for all cross sections.

Profile Output Table - Standard Table 1							
File Options Std. Tables Locations Help							
HEC-RAS Plan: Unsteady flo River: ARROYO CALLE 65 Reach: SEGUNDA BRIGADA							
Reach	River Sta	Profile	Q Total (m ³ /s)	Min Ch El (m)	W.S. Elev (m)	Vel Chnl (m/s)	Flow Area (m ²)
SEGUNDA BRIGADA	120	1 MIN	0.02	86.08	86.09	0.25	0.08
SEGUNDA BRIGADA	120	2 MIN	0.07	86.08	86.09	0.87	0.08
SEGUNDA BRIGADA	120	3 MIN	0.12	86.08	86.09	1.08	0.11
SEGUNDA BRIGADA	120	5 MIN	0.28	86.08	86.10	1.50	0.19
SEGUNDA BRIGADA	120	6 MIN	0.44	86.08	86.10	1.78	0.25
SEGUNDA BRIGADA	120	7 MIN	0.53	86.08	86.11	1.91	0.28
SEGUNDA BRIGADA	120	9 MIN	0.79	86.08	86.11	2.21	0.36
SEGUNDA BRIGADA	120	9 MIN	1.09	86.08	86.12	2.49	0.44
SEGUNDA BRIGADA	120	10 MIN	1.23	86.08	86.12	2.60	0.47
SEGUNDA BRIGADA	120	11 MIN	1.53	86.08	86.12	2.82	0.54
SEGUNDA BRIGADA	120	12 MIN	1.76	86.08	86.12	2.96	0.59
SEGUNDA BRIGADA	120	13 MIN	1.90	86.08	86.13	3.05	0.62
SEGUNDA BRIGADA	120	14 MIN	2.04	86.08	86.13	3.12	0.65
SEGUNDA BRIGADA	120	15 MIN	2.16	86.08	86.13	3.19	0.68
SEGUNDA BRIGADA	119	1 MIN	0.02	84.93	84.97	0.81	0.02
SEGUNDA BRIGADA	119	2 MIN	0.07	84.93	85.00	0.58	0.12
SEGUNDA BRIGADA	119	3 MIN	0.12	84.93	85.02	0.61	0.20
SEGUNDA BRIGADA	119	5 MIN	0.28	84.93	85.04	0.77	0.37
SEGUNDA BRIGADA	119	6 MIN	0.44	84.93	85.06	0.92	0.46
SEGUNDA BRIGADA	119	7 MIN	0.53	84.93	85.06	0.99	0.53
SEGUNDA BRIGADA	119	8 MIN	0.79	84.93	85.08	1.17	0.68
SEGUNDA BRIGADA	119	9 MIN	1.09	84.93	85.10	1.34	0.82
SEGUNDA BRIGADA	119	10 MIN	1.23	84.93	85.11	1.41	0.88
SEGUNDA BRIGADA	119	11 MIN	1.53	84.93	85.12	1.54	0.99
SEGUNDA BRIGADA	119	12 MIN	1.76	84.93	85.13	1.63	1.08
SEGUNDA BRIGADA	119	13 MIN	1.90	84.93	85.14	1.69	1.13
SEGUNDA BRIGADA	119	14 MIN	2.04	84.93	85.14	1.74	1.18
SEGUNDA BRIGADA	119	15 MIN	2.16	84.93	85.15	1.78	1.21

Fig. 14 Output table of steady flow analysis

The difference of water surface elevation (W.S. Elev) and minimum channel elevation (Min. Ch. El) is the water level (y) and the product of water level times vel. Ch is the cross section's hazard level.

$$\text{Water level}_{(\text{cross section})} = W.S. Elev. (m) - Min. Ch. Elev. (m) \quad (6)$$

$$\text{Water level } (y) * \text{Vel. Chn. } (v) = \text{Hazard Level } (m^2/s) \quad (7)$$

The following Manning's Equations (Chow, 1994) calculate the water velocity and flow as a function of water level sensor measurements assuming rectangular cross sections

$$(V) = \frac{1}{\eta} \left(\frac{b*y}{b+2y} \right)^{2/3} \sqrt{S} \quad (8)$$

$$(Q) = \frac{1}{\eta} A \left(\frac{b*y}{b+2y} \right)^{2/3} \sqrt{S} \quad (9)$$

where

V = Water velocity, (m/s)

Q = Flow Rate, (m³/s)

A = Flow Area, (m²)

η = 0.015 (Manning's Roughness Coefficient)

b = Width of the street (m)

y = Water level (m)

S = Channel Slope, (m/m)

4 Transformation of the forecast into a warning

The aim of an EWS is to provide real-time monitoring of the variables that are involved in different types of threats, the timing of decision-making and propagation of warnings and information (Wächter et. al 2012) (Falconer et. al. 2009). In this project, three interconnected processes: acquisition, information processing and diffusion, describe the early warning architecture. Figure 15 illustrates the network architecture processes.

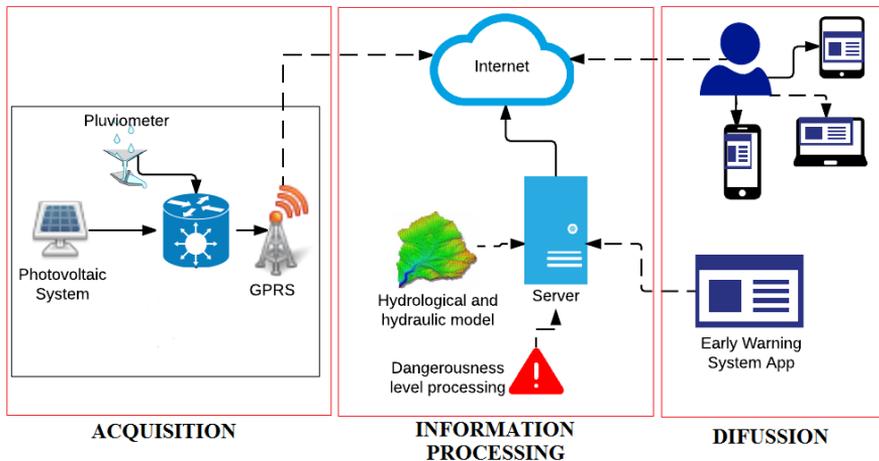


Fig. 15 Network Architecture processes

a) **ACQUISITION:** This process involves the installation of nodes and their configuration and sending the information to the web server. To achieve this, it is necessary to take into account technical and social requirements for selecting proper devices and node installation. The following are the technical and social requirements for equipment selection and implementation:

- The transmission of the data has to be in real-time
- The measurements will be managed remotely and the sensors cannot be in touch with the stream .It is mandatory to avoid any impact with vehicles and

debris dragged by the stream that can damage the sensors and introduce measurement errors.

- All the equipment must be weatherproof and be highly resistant to salinity and humidity, due to the environmental conditions of tropical climate.
- Wireless network coverage
- Accessibility
- Security against theft and damage

b) **INFORMATION PROCESSING:** The web server contains the model calculations to process the precipitation values, to produce the cumulative hydrographs, and to use HEC-RAS to calculate water level (y) and water velocity (v) for each cross section and obtain the product vy (m^2/s) that determines the hazard level. The system allows remote configuration of the nodes.

c) **DIFUSSION:** Currently, in the city of Barranquilla there is no information system that timely informs the community about the state of the streams during the rain events. As non-structural measures, the administrations carried out the identification and signaling of the most hazardous streams in the city, but this has not been enough for people to make timely decisions in the face of the disaster. Therefore, the project described in this article is presented as a system that will allow the community to know during the rain event the hazardous level of the stream and make a decision.

A study conducted in Hong Kong investigated the information sources people would use during a disaster to make decisions that protect their lives (Kin et al., 2017). This study found that people over 65 prefer that information be sent through media such as television and radio, while younger people prefer media such as social networks. Another study conducted in the community of Kaijuri Union, Bangladesh, determined the preference of media for the dissemination of alerts in order to create a flood risk map (Fakhruddin, Kawasaki, & Babel, 2015). This study agrees with the study in Hong Kong, where young people prefer to obtain information quickly through their mobile devices.

Because flash floods are rapid formation, it is necessary that the information sent be clear, concise and arrive through rapid access information media such as mobile applications and text messages.

As previous work, a web platform was developed in (Cama et al 2016) that displayed the hazard level information for a given point of interest as a traffic light sign (Fig. 16). A green light means the stream is not dangerous and the red light means it is dangerous to cross the stream. The web platform updated the information every three minutes and provides information on several points along the stream path. It was carried out on the intensity, estimated runoff, water level and velocity for each observation point.

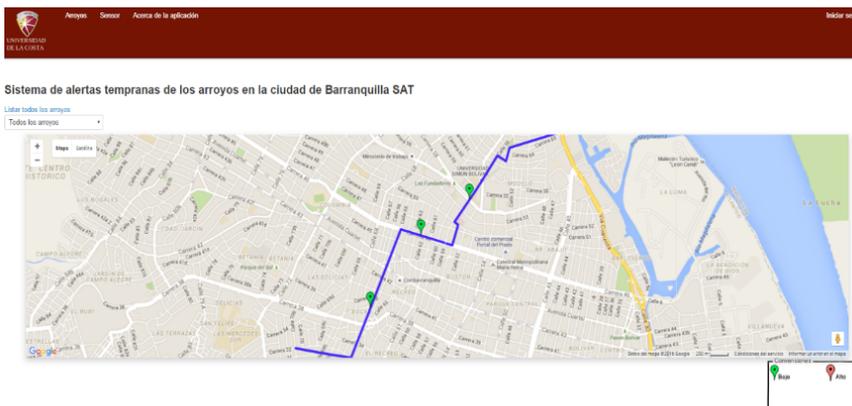


Fig. 16 Web platform prototype (Cama et al 2016)

Taking into account the preference of younger people for the use of social networks as a media of disseminating alerts, an update was made to this tool with the sending of notifications via Twitter and telegram app. Likewise, it allows to visualize the state of different points of the stream and indicates if it can be crossed or not by pedestrians and vehicles. In the following link the described application is displayed www.isatbaq.com.co.

5 Results and discussion

The El Niño Southern Oscillation (ENSO) phenomenon is the most important phenomenon involving the ocean and the atmosphere in the tropical Pacific Ocean; it influences many countries with extreme rainfall and dry conditions, producing huge socio-economic impacts. (Davey et al. 2014) (Zolotokrylin et al. 2016). The Colombian Caribbean was affected by ENSO during the years 2014 and 2015, which reduced the number of rainfall events in Barranquilla by 92.9% (IDEAM 2015).

We selected two rainfall events; one with a short duration and low intensity and the other with prolonged duration and high intensity. Since there are no previous measurements of water level and water velocity for this basin, this study considered water level sensor (y_m) measurements as a reference value. Likewise, the reference values of water velocity (v_c) was calculated using cross-section geometry, Manning equations and water level sensor measurements. The radar sensor has a measurement error of ± 2 mm, but is susceptible to various sources of errors such as strong winds during rainfall and transmission delays.

This study compares the measurements of the water level sensor (y_m) and the calculated water velocity (v_c) with water level and velocity results from the developed model named HEC-RAS/M, as well as hazard level (v_y) results from HEC-RAS/M and the product of level measurements times water velocity calculations ($v_c * y_m$)

a) Rainfall Event 1

Table 5 presents the precipitation values of the rainfall event with duration of 20 minutes, and total precipitation of 11.4 mm.

Table 8 Rainfall event 09/17/2015

TIME	Precipitation (mm)
9/17/2015 13:10	2.8
9/17/2015 13:15	2
9/17/2015 13:20	3.8

9/17/2015 13:25	2.8
TOTAL	11.4

Using the values of Table 5, the model estimates the time variation of water level, water velocity, flow and the hazard level. Figures 17 and 18 compare the water level measured with the radar sensor (y_m) and the water level obtained by the model (HEC-RAS/M) for Node 1 and Node 3. Figures 19 and 20 compare the water velocities and Figures 21 and 22 the hazard levels.

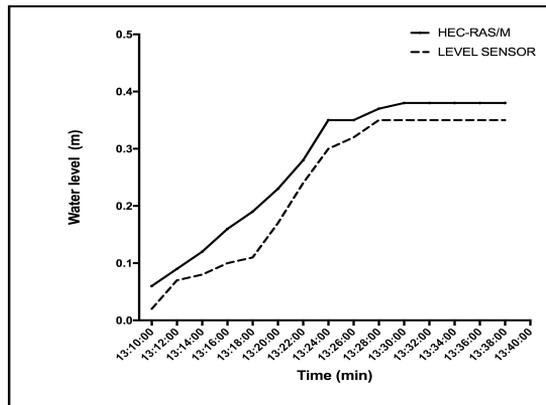


Fig. 17 Water level at Node 1 Event 1

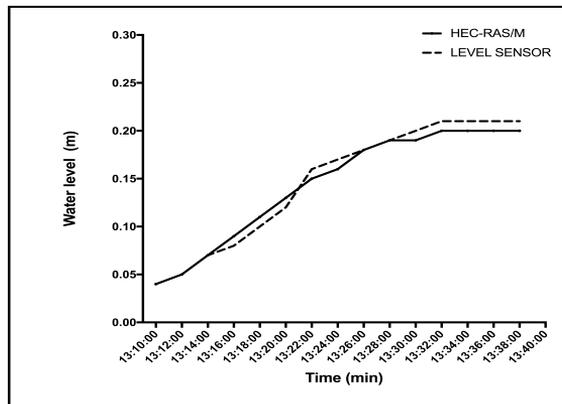


Fig. 18 Water level at Node 3 Event 1

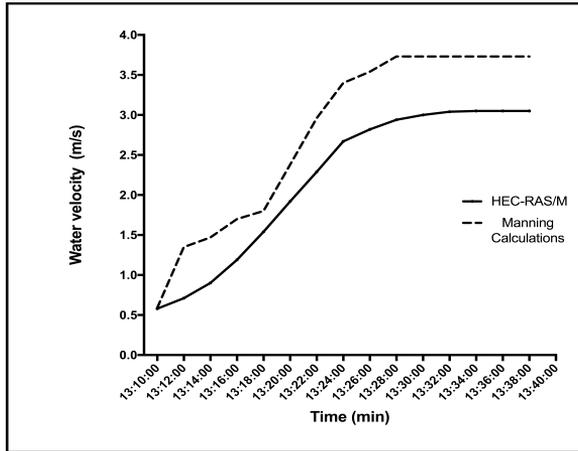


Fig. 19 Water velocity at Node 1 Event 1

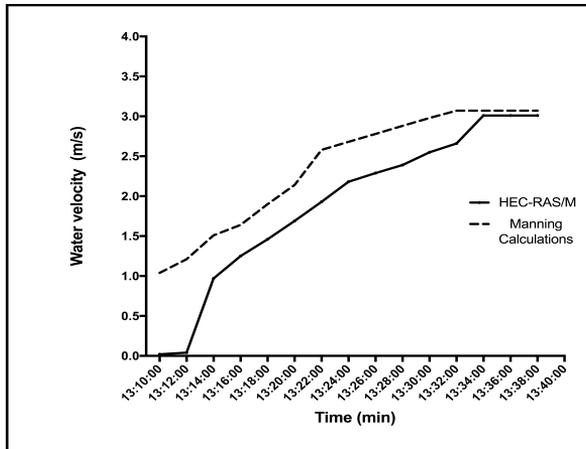


Fig. 20 Water velocity at Node 3 Event 1

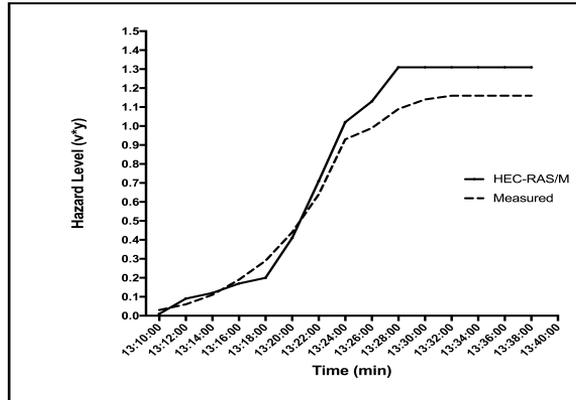


Fig. 21 Hazard level at Node 1 Event 1

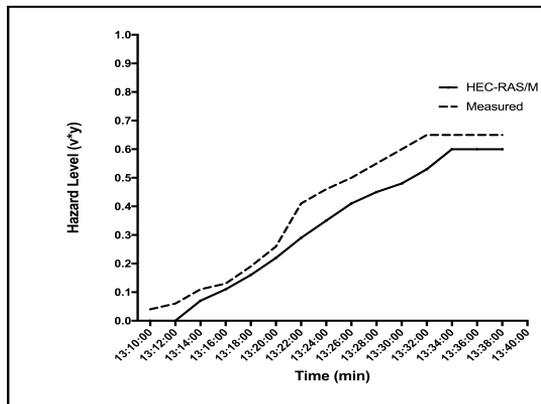


Fig. 22 Hazard level at Node 3 Event 1

Since the selected hazard threshold for pedestrian is $0.22 \text{ m}^2/\text{s}$, for node 1, the product of the water level sensor times the calculated water velocity ($vc*ym$) detected that the stream became dangerous for pedestrians at 13:18 with a hazard level of $0.29 \text{ m}^2/\text{s}$, 8 minutes after it started to rain. According to the HEC-RAS/M model, the stream became dangerous for pedestrians at 13:20, 2 minutes later ($vc*ym$), which to these effects is considered the measured value. For node 3, the measured values and the proposed model did not display any difference in time for pedestrians; both registered the hazard level at 13:20, 10 minutes after it began to rain.

The criteria for vehicles obtained by (Martínez-Gomariz, Gómez, Russo, & Djordjević, 2017) proposes that for mini, light and compact vehicles the stream is dangerous when the ratio $v*y$ reaches a value between 0.49-0.64 m^2/s . For node 1, the stream reaches a value of 0.64 m^2/s at 13:22, 2 minutes after the alert issued for pedestrians. Also, for node 3 the stream becomes dangerous for this type of vehicle at 13:22, only two minutes apart with the alert issued for pedestrians that are at that point.

Considering that the difference in time in which the stream becomes dangerous for pedestrians and vehicles is very small, the use of the most restrictive criterion that is used for pedestrians is ratified.

b) Rainfall event 2

Using cross-section geometry (width, curbs height, length and slope) and a Manning roughness coefficient of 0.015, peak discharge (q_p) for each cross-section before overflow was estimated. The average slope of the channel is 1.8%, average curb height is 0.54m and the width of the cross-sections is in the range of 5.6 m to 22.94 m. The peak discharge has range of 3.47 $m^3.s^{-1}$ to 113.16 $m^3.s^{-1}$ and an average of 31.64 $m^3.s^{-1}$. Due to the high flow rate and the risk of overflow, as an emergency solution, people have built walls along the stream to avoid flooding and damage to their properties, thus changing the channel's geometry over time. Therefore, during high rainfall events overflow can occur in some cross-sections, while not in others. Fig. 23 shows the maximum flow for each cross-section.

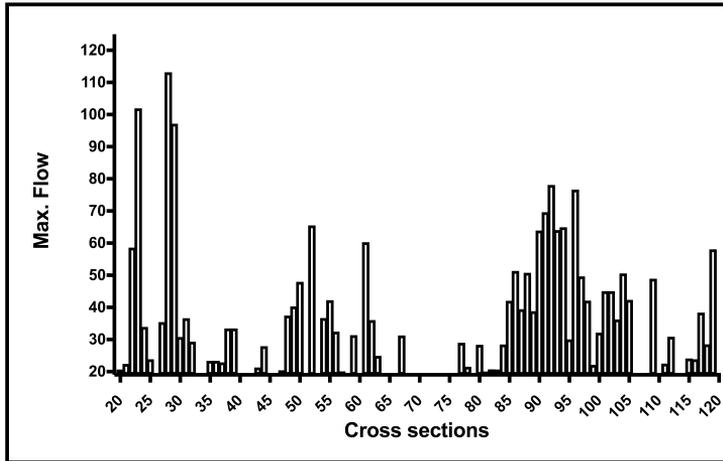


Fig. 23 Maximum cross-section flow before overflow

When peak discharge q_p from an effective rainfall is greater than the maximum cross-section peak discharge (Mq_p), overflow occurs, which makes it difficult to calculate the actual flow at the cross-sections.

Table 6 shows heavy rainfall with duration of 105 min. and total precipitation of 87.6 mm. Using the proposed hydraulic model and Manning equations, the accumulated flow was calculated for each precipitation measurement.

Table 9 High rainfall event in September 2015

TIM E	Precipitation (mm)	Accumulated flow ($m^3.s^{-1}$)	TIM E	Precipitation (mm)	Accumulated flow ($m^3.s^{-1}$)
9:52	1.2	0.02	11:13	1.4	37.54
9:57	0	0.02	11:18	0.8	24.11
10:02	1.2	0.04	11:23	0.2	17.33
10:07	8	14.45	11:29	0	11.93
10:12	9.2	35.48	11:34	0.4	8.29

10:17	11.8	64.76	11:39	0	7.05
10:23	16.8	109.22	11:23	0	7.05
10:28	13.6	140.72	11:29	0	7.05
10:33	11.8	158.67	11:34	0	6.04
10:38	5.8	161.35	11:39	0	4.53
10:43	1.6	161.36	11:23	0	2.33
10:48	1.2	156.75	11:29	0	0.74
10:53	0.6	140.85	11:34	0	0.12
10:58	0.8	111.81	11:39	0	0.02
11:03	0.6	80.79	11:23	0	0
11:08	0.6	55.49	11:34	0	0

Comparing Figure 23 and Table 6, the flow starts to exceed the average cross-section peak discharge at 10:12 and from 10:28 to 10:53 the flow has exceeded the maximum capacity in all cross-sections. With the HEC-RAS/M model, the accumulated hydrograph was calculated for interval [10:17-10:23], where the stream has overflowed at 90% of the cross sections. The HEC-RAS/M calculated the water level variation and overflow for each cross-section. Figures 24 and 25 show the variation of the water level in the cross sections associated with nodes 1 and 3 for the interval [10:17 -10: 23] using the HEC-RAS hydraulic software. The figures indicate the minute to minute variation of the water level for the interval with different legends.

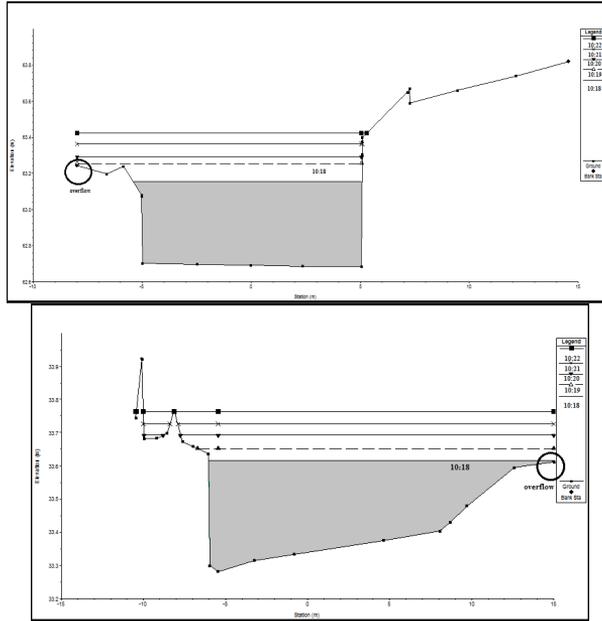


Fig. 24 Water level variation at Node 1 Fig. 25 Water level variation at Node 3

For node 1 the overflow occurred after 2 minutes, when precipitation of 11.8 mm was recorded by rain gauges; it means the water exceeds the maximum height of the cross section. For node 3 the overflow occurred 1 minute later.

Figures 26 and 27 compare the water level and figure 28 and 29 compare the water velocity obtained by the HEC-RAS/M model for node 1 and 3 with water level data y_m and the calculated water velocity v_c for event 2.

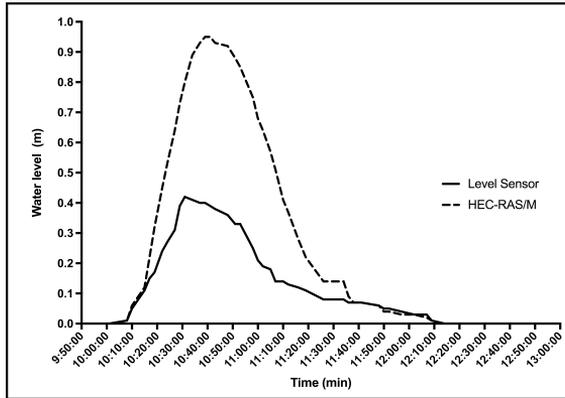


Fig. 26 Water level at Node 1 Event 2

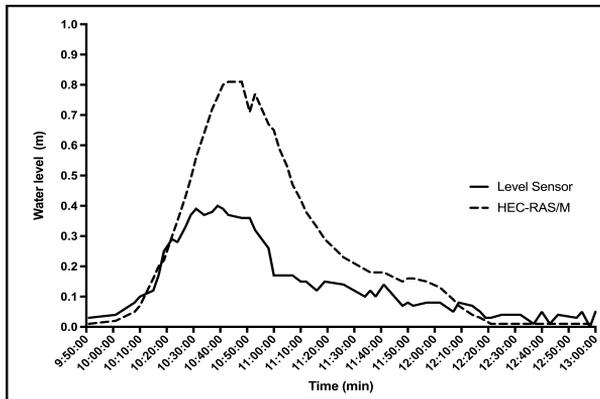


Fig. 27 Water level at Node 3 Event 2

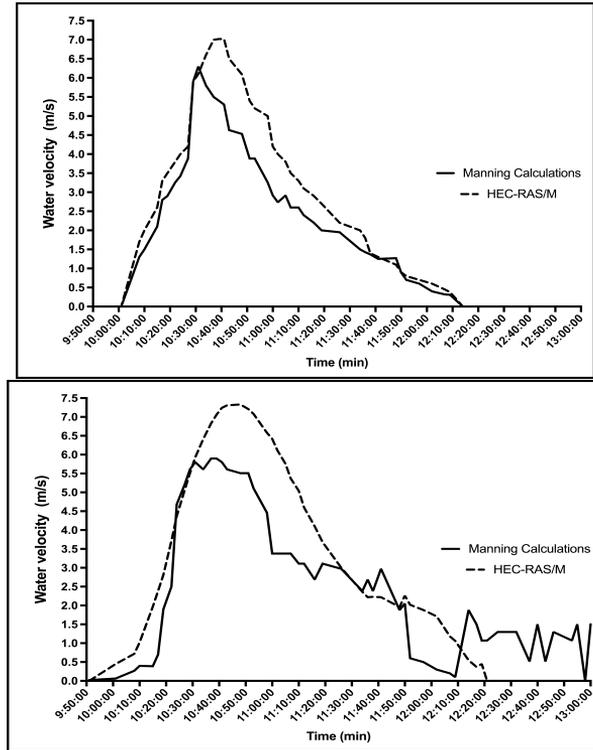


Fig. 28 Water velocity at Node 1 Event 2 Fig. 29 Water velocity at Node 3 Event 2

From figures 26 and 27 the interval [10:19 - 11:52] reflects a visible difference between the value of the water level sensor and the obtained by the proposed model; this is because the model estimates the height that the water can reach without considering any overflow at the cross sections. Table 7 compares the hazard level obtained by the HEC-RAS/M and the product ($v_c * v_y$) and figures 30 and 31 illustrates the time variation.

Table 10 Hazard level Node 1 and Node 3 for event 2

TIME	Measure d (N1)	HEC- RAS/ M (N1)	Measured (N3)	HEC- RAS /M (N3)	TIME	Measure d (N1)	HEC- RAS/ M (N1)	Measure d (N3)	HEC- RAS/ M (N3)
9:51	0.000	0.000	0.001	0.000	11:1 9	0.220	0.356	0.467	1.067
10:01	0.000	0.000	0.003	0.009	11:2 6	0.156	0.280	0.416	0.690
10:08	0.013	0.017	0.022	0.036	11:3 4	0.120	0.203	0.238	0.448
10:10	0.075	0.120	0.040	0.071	11:3 6	0.100	0.162	0.322	0.400
10:15	0.231	0.312	0.047	0.315	11:3 8	0.096	0.098	0.238	0.401
10:17	0.420	0.726	0.119	0.478	11:4 1	0.088	0.091	0.416	0.400
10:19	0.493	1.120	0.475	0.618	11:4 8	0.076	0.066	0.132	0.294
10:22	0.782	1.710	0.725	1.116	11:5 0	0.045	0.036	0.164	0.240
10:24	0.924	2.120	1.311	1.529	11:5 2	0.035	0.032	0.042	0.225
10:27	1.204	2.688	1.719	2.176	11:5 7	0.024	0.021	0.040	0.212
10:29	2.301	4.307	2.075	2.700	12:0 2	0.012	0.018	0.024	0.202
10:31	2.646	4.880	2.263	3.321	12:0 7	0.010	0.009	0.010	0.106
10:34	2.378	5.874	2.075	4.102	12:0 9	0.003	0.004	0.008	0.074
10:37	2.200	6.510	2.241	4.918	12:1 4	0.000	0.000	0.132	0.022
10:39	2.160	6.669	2.359	5.366	12:1 7	0.000	0.000	0.075	0.011
10:41	2.067	6.669	2.263	5.792	12:1 9	0.000	0.000	0.032	0.009
10:43	1.759	6.045	2.075	5.921	12:2 1	0.000	0.000	0.032	0.000

10:48	1.631	5.603	1.984	5.937	12:2 5	0.000	0.000	0.052	0.000
10:51	1.281	4.752	1.984	5.119	12:3 2	0.000	0.000	0.052	0.000
10:53	1.281	4.420	1.634	5.452	12:3 7	0.000	0.000	0.005	0.000
10:58	0.815	3.750	1.160	4.409	12:4 0	0.000	0.000	0.075	0.000
11:00	0.613	2.856	0.574	4.173	12:4 3	0.000	0.000	0.005	0.000
11:02	0.520	2.560	0.574	3.605	12:4 6	0.000	0.000	0.052	0.000
11:05	0.525	2.166	0.574	3.053	12:5 3	0.000	0.000	0.032	0.000
11:07	0.364	1.785	0.574	2.524	12:5 5	0.000	0.000	0.075	0.000
11:10	0.364	1.353	0.467	2.117	12:5 8	0.000	0.000	0.000	0.000
11:12	0.312	1.147	0.467	1.748	13:0 0	0.000	0.000	0.075	0.000
11:16	0.264	0.812	0.322	1.353					

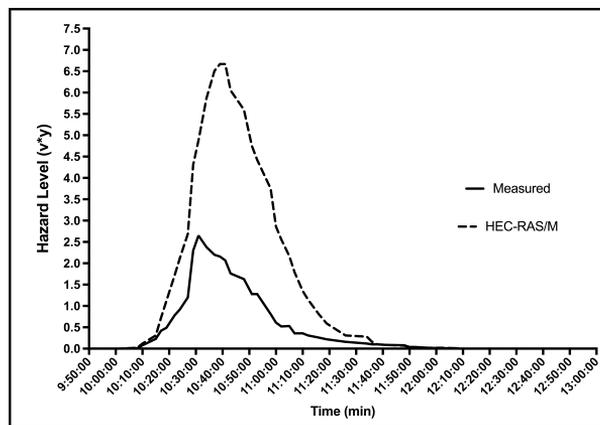


Fig. 30 Hazard level at Node 1 Event 2

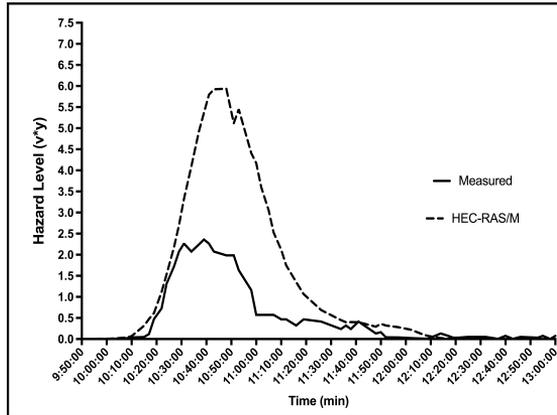


Fig. 31 Hazard level at Node 3 Event 2

Figures 30 and 31 demonstrate the effects of not considering the possibility of overflow at cross-sections by HEC-RAS/M; however, according to the results of table 7, this does not affect the hazard level alert for pedestrians. For node 1, both the proposed model and the measured values indicated that the stream became hazardous at 10:15, and that it was no longer hazardous for the HEC-RAS / M model at 11:26, whereas based on measured output values the time was 11:19, a difference of 7 minutes. For node 3, the HEC-RAS/M model indicated that the stream became hazardous at 10:15, 4 minutes before the measured values. Lastly, the stream was no longer hazardous at 11:48 according to measured values, whereas the proposed model indicated this condition at 11:52, a difference of 4 minutes.

The hydrological and hydraulic model presented in this research (HEC-RAS / M) allows detection of the hazard level in real time in all cross-sections using only the rain gauge information, the topographic survey and a communications system to transmit and display the warning to the community; therefore, water level and velocity sensors are not needed for a desired observation point. Likewise, this EWS does not require historical data, which makes it suitable for ungauged basins. Removing the water level sensor from the network architecture reduces data and power requirements.

Conclusions

1. This study developed an EWS to alert the community of the hazard level of flash floods formed during heavy rains in the streets of the city of Barranquilla, Colombia. This represents a non-structural risk mitigation measure to prevent pedestrians from being swept away by the torrent when they attempt to cross a flooded street.

2. An hydrological and hydraulic model calculated the water level, velocity and flow and their time variation at stream cross sections in an ungauged basin using only rain gauges and topographic survey data. The hydrological model applied the Curve Number method from NRCS to estimate the effective rainfall and the Synthetic Unit hydrograph to determine the cumulative time distribution of the runoff for each precipitation measurement. The hydraulic software HEC-RAS estimated the time variation of water level, velocity and flow using the cross-section geometry and cumulative runoff distribution for each precipitation measurement. This model has a temporal resolution of 1 minute and spatial resolution of 50 meters and allows predictions for up to 3 hours. Since the model does not need historical data, it is suitable for most urban basins.

3. During a rainfall event the product of water level (y) times water velocity (v) vy is used to set the criteria to determine the hazard level of an observed point. The established hazard threshold for pedestrians is $vy=0.22 \text{ m}^2/\text{s}$. The web platform displays a red light for values greater than or equal to the hazard threshold and a green light when this value is not reached.

4. The study selected two rainfall conditions and compared the hazard level results obtained by the proposed HEC-RAS/M model to reference values during these rainfall events. The first condition was rainfall of short duration and low intensity, and the other was rainfall of prolonged duration and high intensity. For rainfall condition one, at node 1 (cross-section 93) the detected hazard level had a difference of 2 minutes compared to reference values and HEC-RAS/M results. For node 3 (cross-section 40) no difference of time for hazard level was found between the two measurements.

Rainfall of prolonged duration and high intensity causes overflow at most cross-sections. HEC-RAS/M calculates the water level and velocity at each cross-section without considering this condition; consequently, model values are greater

than reference values. However, this condition does not affect hazard level detection, as the results for node 1 and 3 indicate.

5. In order to improve dissemination of the information, displays with hazard level information should be installed at certain points along the stream path and links should be established between the web platform and social networks

ACKNOWLEDGEMENTS

This project was developed in collaboration with the Institute for Molecular Imaging Instrumentation (I3M) of Polytechnic University of Valencia, Spain, in the area of Electronic Systems Design, and funded by the Administrative Department of Science, Technology and Innovation of the presidency of the Republic of Colombia (COLCIENCIAS)

REFERENCES

Abt, S., Wittier, R., Taylor, A. and Love, D. (1989). Human stability in a high flood hazard zone. *Journal of the American Water Resources Association*, 25(4), pp.881-890.

Archer, D. and Fowler, H. (2015). Characterizing flash flood response to intense rainfall and impacts using historical information and gauged data in Britain. *Journal of Flood Risk Management*, p.n/a-n/a.

Arrieta, J. and Fernandez, Y. (2015). *Estimación de los caudales del arroyo la segunda brigada II para diferentes períodos de retorno aplicando las herramientas computacionales EPA-SWMM y HEC-RAS*. Undergraduate. Universidad de la Costa.

Benzerra, A., Cherrared, M., Chocat, B., Cherqui, F. and Zekiouk, T. (2012). Decision support for sustainable urban drainage system management: A case study of Jijel, Algeria. *Journal of Environmental Management*, 101, pp.46-53.

Borga, M., Boscolo, P., Zanon, F. and Sangati, M. (2007). Hydrometeorological Analysis of the 29 August 2003 Flash Flood in the Eastern Italian Alps. *J. Hydrometeorol*, 8(5), pp.1049-1067.

Cama-Pinto, A., Piñeres-Espitia, G., Zamora-Musa, R., Acosta, M., Caicedo-Ortiz, J and Sepúlveda-Ojeda, M. (2016). Diseño de una red de sensores inalámbricos para la monitorización de inundaciones repentinas en la ciudad de Barranquilla – Colombia. *INGENIARE, Revista chilena de Ingeniería*. ISSN 0718-3291 24 (4).

CCRFCD (Clark County Regional Flood Control District). (1999). Hydrologic criteria and drainage design manual. (1999). [Las Vegas, NV.]

Cherqui, F., Belmeziti, A., Granger, D., Sourdril, A. and Le Gauffre, P. (2015). Assessing urban potential flooding risk and identifying effective risk-reduction measures. *Science of The Total Environment*, 514, pp.418-425.

Chow, V., Maidment, D., Mays, L. (1994). *Applied Hydrology*. New York. McGraw-Hill.

Chow, V. (1994). *Open-channel hydraulics*. New York: McGraw-Hill.

Douglas, I., Garvin, S., Lawson, N., Richards, J., Tippett, J. and White, I. (2010). Urban pluvial flooding: a qualitative case study of cause, effect and nonstructural mitigation. *Journal of Flood Risk Management*, 3(2), pp.112-125.

Davey, M., Brookshaw, A. and Ineson, S. (2014). The probability of the impact of ENSO on precipitation and near-surface temperature. *Climate Risk Management*, 1, pp.5-24.

Falconer, R., Cobby, D., Smyth, P., Astle, G., Dent, J. and Golding, B. (2009). Pluvial flooding: new approaches in flood warning, mapping and risk management. *Journal of Flood Risk Management*, 2(3), pp.198-208.

Gomez, M. ed., (2007). *Hidrología Urbana*. 1st ed. Barcelona: Dinàmica fluvial i enginyeria hidrològica FLUMEN, pp.147-174.

Gomez, M. (2008). Curso de hidrología urbana. 7th ed. Barcelona: Universitat Politècnica de Catalunya.

Fakhruddin, S. H. M., Kawasaki, A., & Babel, M. S. (2015). Community responses to flood early warning system: Case study in Kaijuri Union, Bangladesh. *International Journal of Disaster Risk Reduction*, 323–331.

IDEAM (Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales). (2016). Se intensifica fenómeno el niño y alcanza intensidad moderada. rendición de cuentas - noticias - ideam. [online] ideam.gov.co. available at: http://www.ideam.gov.co/web/sala-de-prensa/noticias/-/asset_publisher/96oxgzahhrhj/content/fenomeno-el-nino-se-intensifica-y-alcanza-intensidad-moderada [accessed 10 aug. 2016].

International Federation of Red Cross and Crescent societies. (2014). World Disasters Report Focus on culture and risk. Retrieved November 20, 2017, from http://www.ifrc.org/Global/Documents/Secretariat/201410/WDR_2014.pdf

Kin, R., Pong, L., Balsari, S., Hsiao, K., Newnham, E., Patrick, K., ... Leaning, J. (2017). Urban disaster preparedness of Hong Kong residents: A territory-wide survey. *International Journal of Disaster Risk Reduction*, 23, 62–69.

Martínez-Gomariz, E., Gómez, M. and Russo, B. (2016). Experimental study of the stability of pedestrians exposed to urban pluvial flooding. *Nat Hazards*, 82(2), pp.1259-1278.

Martínez-Gomariz, E., Gómez, M., Russo, B., & Djordjević, S. (2017). A new experiments-based methodology to define the stability threshold for any vehicle exposed to flooding. *Urban Water Journal*, 14(9), 930–939. <https://doi.org/10.1080/1573062X.2017.1301501>

Nanía, L.S. (1999). Metodología numérica experimental para el análisis del riesgo asociado a la escorrentía pluvial en una red de calles. Doctoral Thesis. Universitat Politècnica de Catalunya, Barcelona, España.

NRCS, Natural Resources Conservation Service, 2009. National Engineering Handbook. Part 630: Hydrology, chapter 7: Hydrologic Soil Groups. Available in (<https://www.wcc.nrcs.usda.gov/ftpref/wntsc/H&H/NEHhydrology/ch7.pdf>)

Östberg, J., Martinsson, M., Stål, Ö. and Fransson, A. (2012). Risk of root intrusion by tree and shrub species into sewer pipes in Swedish urban areas. *Urban Forestry & Urban Greening*, 11(1), pp.65-71. 71

PNUD (Programa de la Naciones Unidas para el Desarrollo Colombia-PNUD, Unidad Nacional para la Gestión del Riesgo). (2012). Proyecto Gestión Integral del Riesgo y Adaptación al Cambio Climático Caribe PNUD-UNGRD, "Plan Departamental de Gestión del Riesgo Atlántico. Bogotá: Panamericana.

Quevauiller, P., & Innocenti, D. (2014). When Science Meets Policy: Enhancing Governance and Management of Disaster Risks. In L. Jhon Wiley & Sons (Ed.), *Hydrometeorological Hazards: Interfacing Science and Policy*.

Rooseboom, A., Basson, M.S., Loots, C.H., Wiggett, J.H. and Bosman, J. (1986). *Manual on Road Drainage*. 2nd ed. Johannesburg: National Transport Commission.

Russo, B. (2009). Design of surface drainage systems according to hazard criteria related to flooding of urban areas, Doctoral thesis. Universitat Politècnica de Catalunya, Barcelona, Spain.

SCS (Soil Conservation Service), US department of Agriculture. (1985). *National Engineering Handbook*, Section 4, Hydrology. US Government Printing Office, Washington, DC, 544.

Shand, T. ., Cox, R. ., Blacka, M. ., & Smith, G. . (2011). *Revision project 10: appropriate safety criteria for vehicles. Report Number: P10/S2/020*.

Špitalar, M., Gourley, J., Lutoff, C., Kirstetter, P., Brilly, M. and Carr, N. (2014). Analysis of flash flood parameters and human impacts in the US from 2006 to 2012. *Journal of Hydrology*, 519, pp.863-870.

Sunkpho, J. and Ootamakorn, Ch. (2011). Real-time flood monitoring and warning system. School of Engineering and Resources. Songklanakarin Journal of Science and Technology. 33 (2), pp. 227-235

Témez, J.R. (1992). Control del desarrollo urbano en las zonas inundables. Madrid: Colegio de Ingenieros de Caminos, Canales y Puertos, 10, pp 105–115. Madrid.

Tingsanchali, T. (2011). Urban flood disaster management. Procedia Engineering, 32(2012), pp.25-27.

UCAR (University Corporation for Atmospheric Research). (2010). Flash Flood Early Warning System Reference Guide 2010. ISBN 978-0-615-37421-5.

UDFCD (Urban Drainage and Flood Control District). (1969). Urban Storm Drainage Criteria Manual: Volume 1 Management, Hydrology, and Hydraulics. UDFCD updated 2016

UNGRD (Unidad Nacional para la Gestión del Riesgo de Desastre). (2012). Guía metodológica para la elaboración de planes departamentales para la gestión del riesgo. Fortalecimiento de las Capacidades Institucionales para la Implementación de Prácticas Locales de Gestión del Riesgo como Medida de Adaptación al Cambio Climático en la Zona Insular y Costera del Caribe Colombiano. COL/72959 PNUD-UNGRD, Panamericana

Yang, T., Yang, S., Ho, J., Lin, G., Hwang, G. and Lee, C. (2015). Flash flood warnings using the ensemble precipitation forecasting technique: A case study on forecasting floods in Taiwan caused by typhoons. Journal of Hydrology, 520, pp.367-378.

Wächter, J., Babeyko, A., Fleischer, J., Häner, R., Hammitzsch, M., Kloth, A. and Lendholt, M. (2012). Development of tsunami early warning systems and future challenges. *Nat. Hazards Earth Syst. Sci.*, 12(6), pp.1923-1935.

Zolotokrylin, A., Titkova, T. and Brito-Castillo, L. (2016). Wet and dry patterns associated with ENSO events in the Sonoran Desert from, 2000–2015. *Journal of Arid Environments*, 134, pp.21-3

