

Gestión del Sistema de Drenaje Pluvial en Barranquilla, Colombia

Problemática, Avances y Retos



Humberto Avila, PhD

Director

Instituto de Estudios Hidráulicos y Ambientales – IDEHA

Universidad del Norte

Octubre 25 de 2016

IDEHA

Instituto de Estudios
Hidráulicos y Ambientales



Introducción

- Exponer los retos, propuestas y soluciones de las lecciones aprendidas de las experiencias del manejo de drenaje pluvial en Barranquilla y los retos en la implementación de los de sistemas urbanos de drenaje sostenible.
- La mayor parte de los trabajos presentados han sido realizados por el Instituto de Estudios Hidráulicos y Ambientales – IDEHA de la Universidad del Norte

DESCRIPCIÓN DE LA PROBLEMÁTICA DEL DRENAJE PLUVIAL EN BARRANQUILLA

Descripción de la problemática



<https://www.youtube.com/watch?v=BCneU0gMOY>

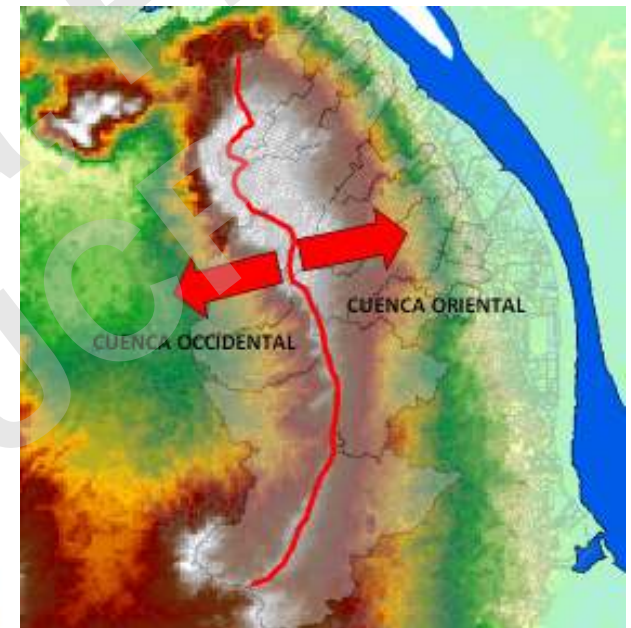
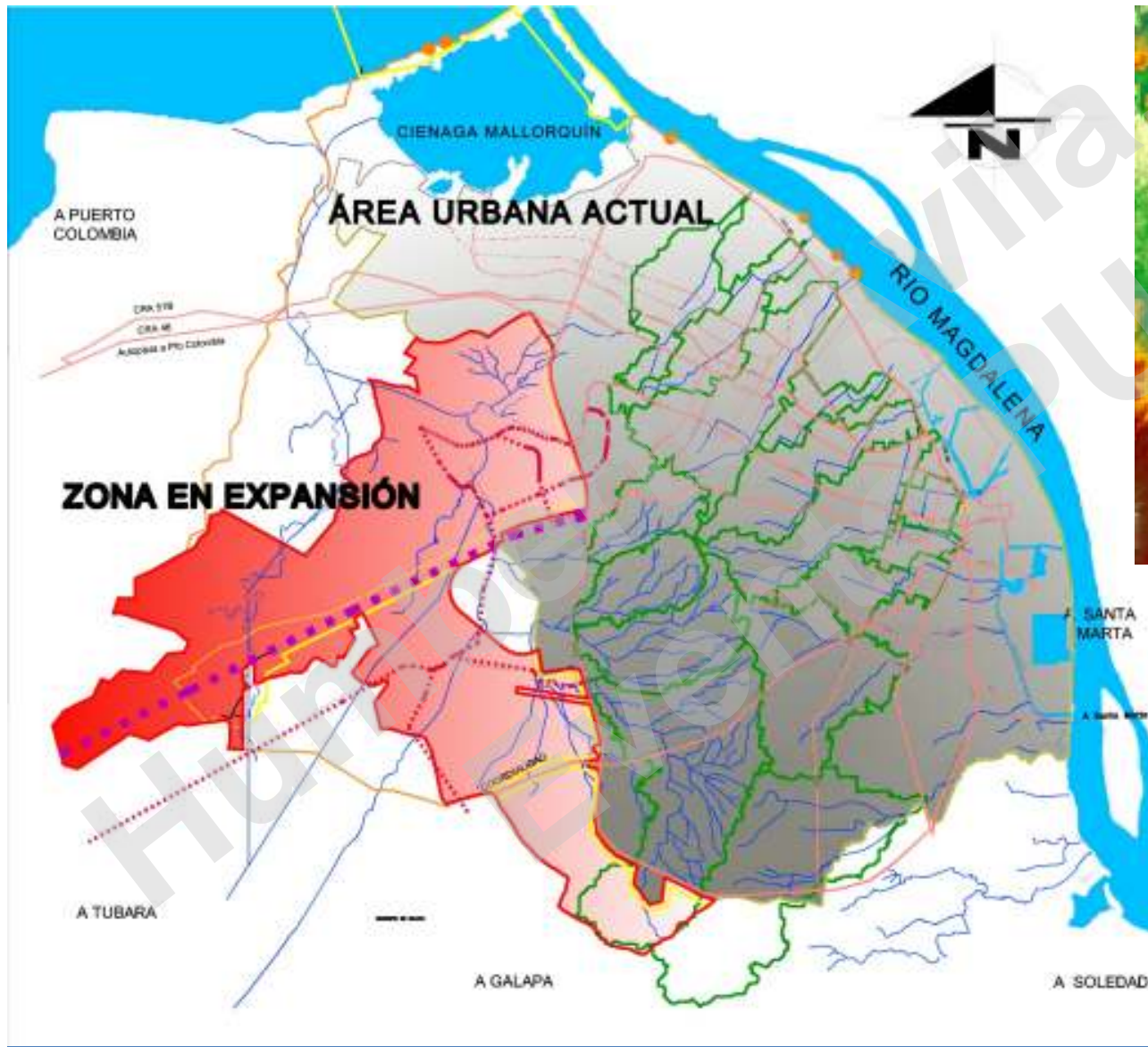
BARRANQUILLA



- Distrito especial, industrial y portuario, ubicado al norte de Colombia.
- Fundada en 1813
- Área: 160 km²
- Habitantes: 1,8 millones aprox.



Barranquilla - Dos enfoques – Dos retos



¿Qué pasa en la Cuenca Oriental de Barranquilla?



Foto: Avila, 2009

No existe un sistema de alcantarillado pluvial más del 90% de la ciudad. El alcantarillado pluvial son las mismas calles.

Viviendas drenan directamente a calles. No se aprovecha la capacidad de almacenamiento e infiltración en cada vivienda

Proceso de impermeabilización masivo. Zonas verdes inútiles.

Características de cuenca oriental

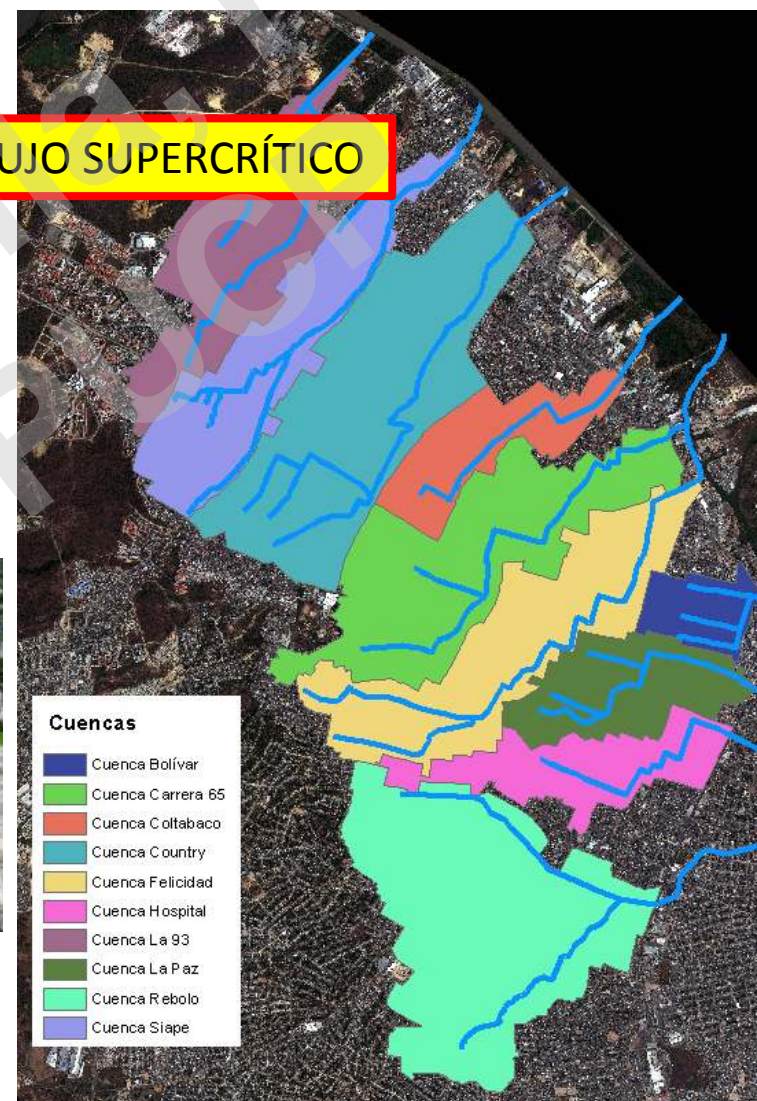
Watershed	Area (Ha)	Main channel street length (Km)	Slope (%)
La 93	262	3.4	1.5
Siape	268	4.5	2.0
Country	371	2.8	3.1
Coltabaco	139	2.5	2.3
Carrera 65	356	4.4	1.9
Felicidad	337	4.4	1.9
Bolívar	68	1.0	1.0
La Paz	166	1.4	3.1
Hospital	164	3.2	2.0
Rebolo	522	3.0	2.0

FLUJO SUPERCRÍTICO



Source: El Universal Newspaper

Source: ADN Newspaper



Caudales estimados en puntos de concentración

**Tabla 1. Caudales pico en puntos de concentración estimados para distintos períodos de retorno
(Ávila, H. 2010). IDEHA - UNINORTE**

Cuenca	Area Cuenca (Ha)	Caudal pico estimado en punto de concentración (m3/s)					
		2 años	5 años	10 años	25 años	50 años	100 años
Calle 91	284	35	47	56	67	76	87
Siape	274	34	46	54	64	74	84
Country	534	58	78	92	110	127	144
Coltabaco	121	17	23	27	33	37	42
Carrera 65	369	45	61	72	86	99	113
Felicidad	422	46	62	73	87	100	114
La Paz	78	12	16	19	22	26	29
Hospital	223	27	37	44	52	60	68
Rebolo	543	59	80	94	113	129	147
Don Juan	857	83	112	132	159	183	208

Profundidades y velocidades estimadas

Tabla 2. Profundidades estimadas para caudales picos en punto de concentración
(Ávila, H. 2010). IDEHA - UNINORTE

Cuenca	Area Cuenca (Ha)	Profundidades estimadas en punto de concentración (m) b = 10 m; So = 0.002; n = 0.015					
		2 años	5 años	10 años	25 años	50 años	100 años
Calle 91	284	0.63	0.76	0.84	0.95	1.04	1.13
Siape	274	0.61	0.75	0.83	0.93	1.01	1.10
Country	534	0.86	1.05	1.17	1.32	1.44	1.57
Coltabaco	121	0.40	0.49	0.54	0.60	0.66	0.71
Carrera 65	369	0.74	0.90	1.00	1.12	1.23	1.34
Felicidad	422	0.74	0.90	1.00	1.13	1.24	1.34
La Paz	78	0.32	0.39	0.43	0.48	0.52	0.56
Hospital	223	0.54	0.65	0.72	0.81	0.89	0.97
Rebolo	543	0.88	1.06	1.18	1.33	1.46	1.59
Don Juan	857	1.09	1.33	1.48	1.67	1.84	2.01

Tabla 3. Velocidades estimadas para caudales picos en punto de concentración
(Ávila, H. 2010). IDEHA - UNINORTE

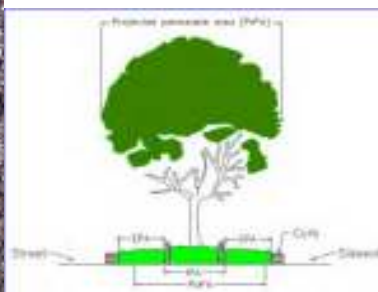
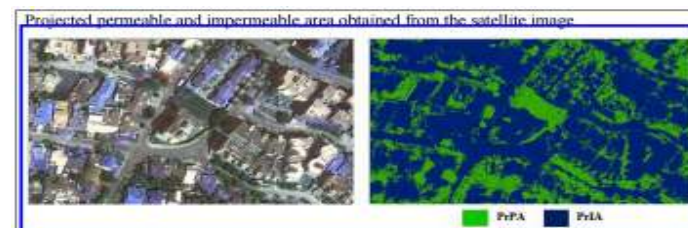
Cuenca	Area Cuenca (Ha)	Velocidades estimadas en puntos de concentración (m/s)					
		2 años	5 años	10 años	25 años	50 años	100 años
Calle 91	284	5.5	6.2	6.6	7.0	7.4	7.7
Siape	274	5.5	6.1	6.5	6.9	7.3	7.6
Country	534	6.7	7.4	7.9	8.4	8.8	9.2
Coltabaco	121	4.2	4.7	5.0	5.4	5.7	6.0
Carrera 65	369	6.1	6.8	7.2	7.7	8.1	8.5
Felicidad	422	6.1	6.8	7.2	7.7	8.1	8.5
La Paz	78	3.7	4.1	4.4	4.7	4.9	5.2
Hospital	223	5.1	5.7	6.0	6.4	6.8	7.1
Rebolo	543	6.7	7.5	7.9	8.4	8.9	9.3
Don Juan	857	7.6	8.4	8.9	9.5	9.9	10.4

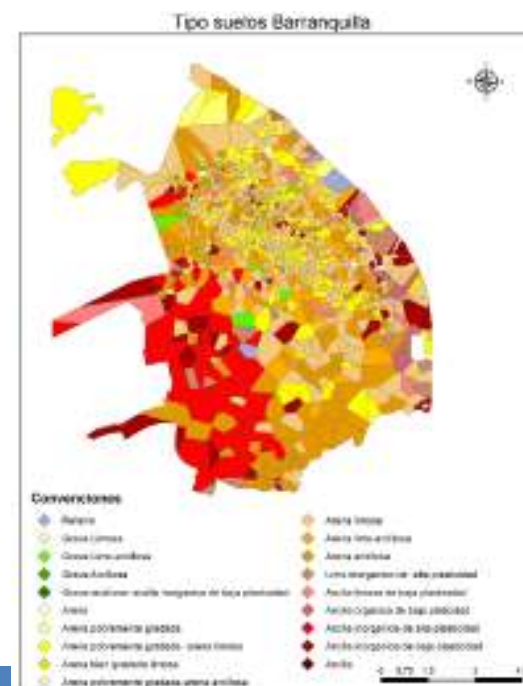
Trabajo de campo y monitoreo



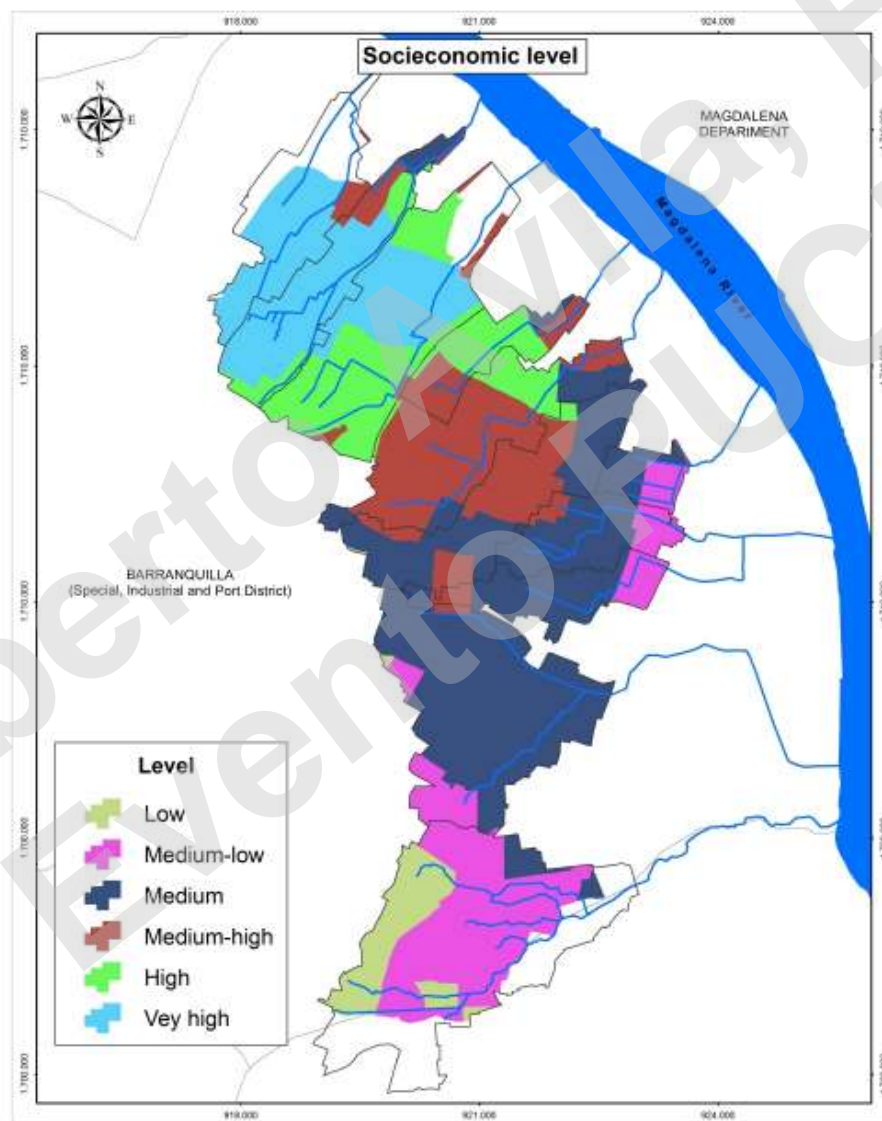
- Permeable/Impermeable
- Imágenes satelitales junto con trabajo de campo

Tipo de Área	Porcentaje %
Área permeable efectiva	27
Área impermeable efectiva	73

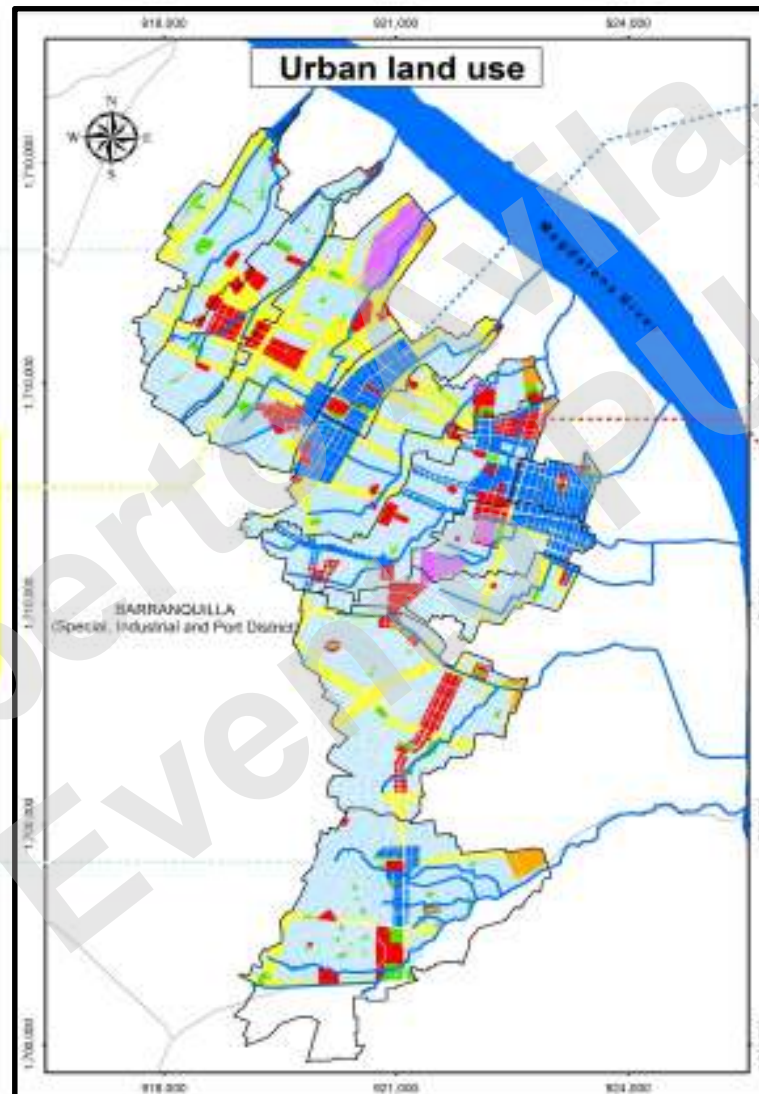




Nivel socio-económico (Income)



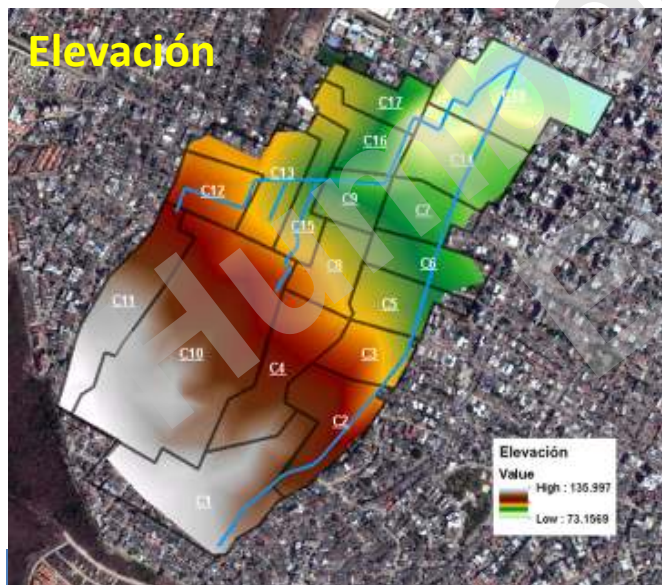
Uso del suelo (Cuenca Oriental)



Monitoreo y trabajo de campo

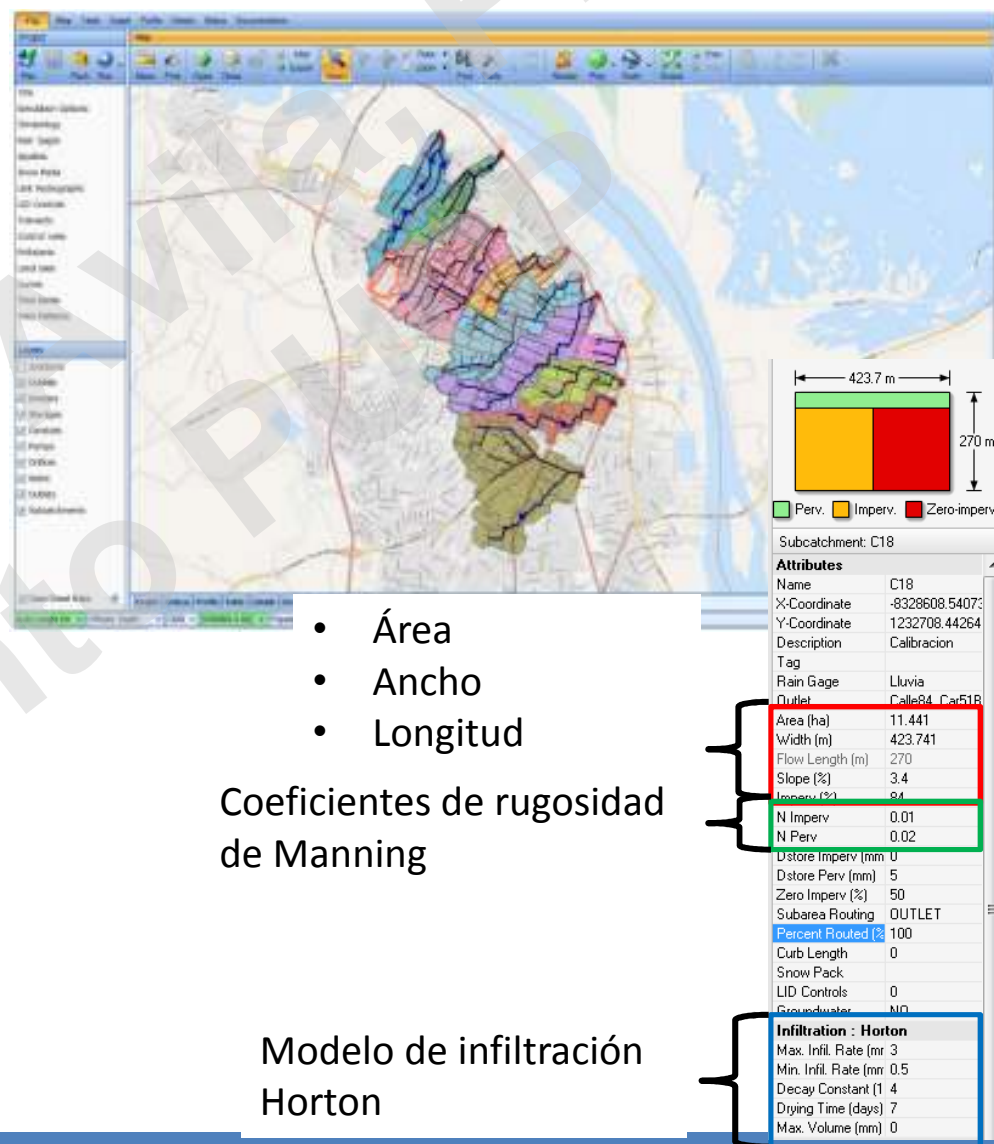


- Medición de precipitación y caudales
- Topografía
- Dirección de flujo
- Áreas imper/perm
- Potencial de SUDS



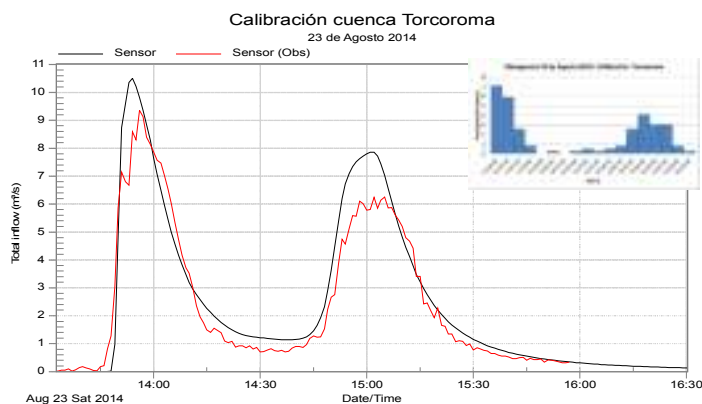
Modelación Numérica Hidrológica/Hidráulica

- Modelación realizada en PCSWMM para 10 cuencas
- El modelo se basa en las características del área de drenaje, tipo de suelo, distribución urbana, topografía, entre otras variables.

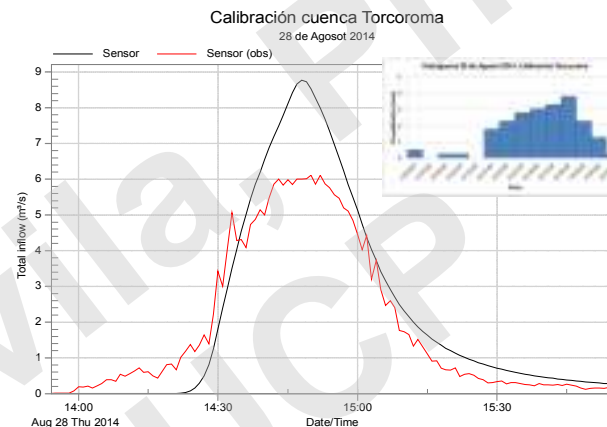


Calibración del modelo – “Torcoroma” subcuenca

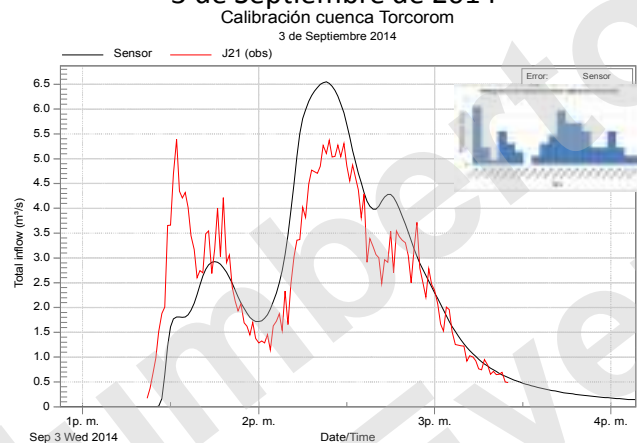
23 de Agosto 2014



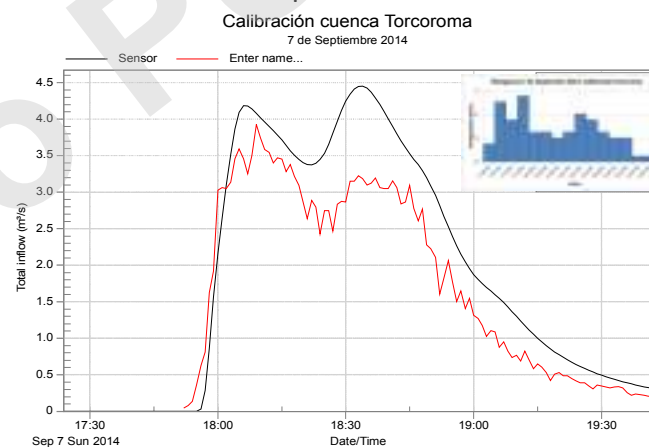
28 de Agosto 2014



3 de Septiembre de 2014



7 de Septiembre de 2014



Adjustment of calibration and validation scenarios

Event	R^2	NSE	ISE	ISE rating	Type
August 23 rd 2014	0.93	0.9	2.91	Excelent	Calibration
August 28 th 2014	0.86	0.81	4.6	Very good	Validation
September 3 rd 2014	0.65	0.41	3.29	Very good	Validation
September 7 th 2014	0.92	0.70	5.93	Very good	Validation

- Coefficient of determination (R^2)
- Nash-Sutcliff efficiency model (NSE) coefficients
- Integral Square Error (ISE).

Análisis de amenaza por flash flow

Se han realizado varios estudios asociados a criterios de seguridad para sistemas de alerta temprana. Cox R.S. (2010) identificó y evaluó la peligrosidad para distintas condiciones de flujo para personas y vehículos.

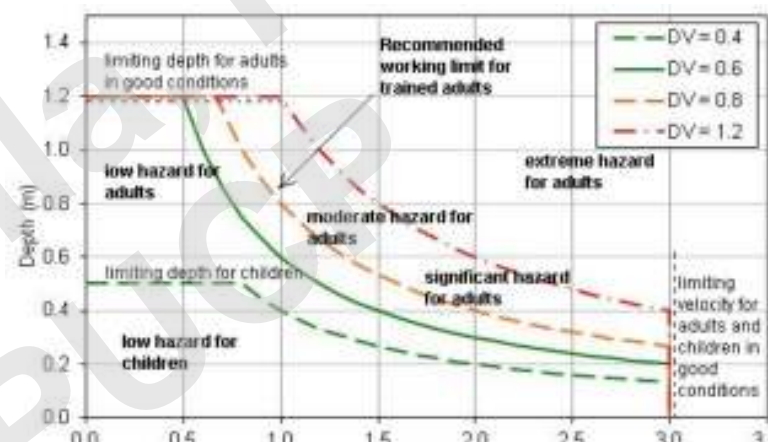
Nivel de peligrosidad (m^2/s):

$$P \left(\frac{m^2}{s} \right) = v \left(\frac{m}{s} \right) * y (m)$$

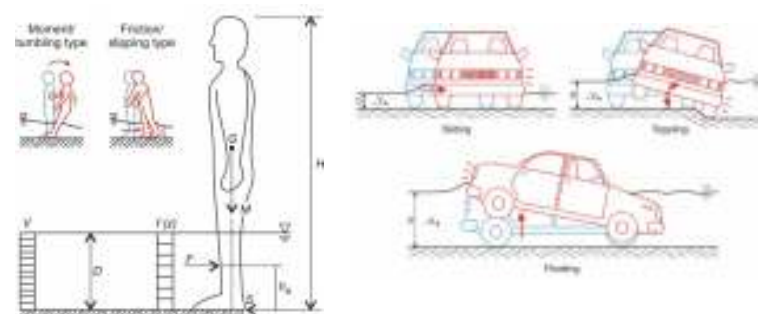
Cinco niveles de peligrosidad

Hazard level (m^2/s)	Color	Description
0 - 0.4	Green	-
0.4 - 0.6	Blue	Low
0.6 - 0.8	Yellow	Medium
0.8 - 1.2	Orange	High
> 1.2	Red	Very High

Source : Cox, 2010



Source : Cox, 2010



Flow instability models for vehicles and people
(Shand, 2011)

Estimación de la peligrosidad máxima para cada arroyo

Máxima peligrosidad basada para distintos períodos de retorno:

Hazard level (m ² /s)	Color	Description
0 - 0.4	Green	-
0.4 - 0.6	Blue	Low
0.6 - 0.8	Yellow	Medium
0.8 - 1.2	Orange	High
> 1.2	Red	Very High

Watersheed	5 years	25 years	50 years	100 years
La 93	9.1	12.1	14.4	14.8
Siape	11.7	14.7	16.2	17.7
Country	15.3	20.5	22.4	23.9
Coltabaco	5.3	6.9	7.1	8.1
Carrera 65	15.1	20.1	21.9	23.8
Felicidad	13.3	17.9	19.6	22.4
Bolivar	3.2	4.1	4.2	4.4
La Paz	6.5	8.8	9	10.1
Hospital	4.7	6.7	7.4	8.2
Rebolo	18.9	26.7	28.6	31.8

Magnitud de velocidad



ALTERNATIVAS DE SOLUCIÓN

Enfoque del Manejo Integral

Conocimiento de las cuencas

Manejo de cuencas

Canalización

Descargas a cuerpos de agua

Gestión, control y mantenimiento

CANTIDAD

ADAPTABILIDAD

CALIDAD

Canalización de tramos aguas abajo



Foto: www.lachachara.org
Canalización Calle 84 (2Km)

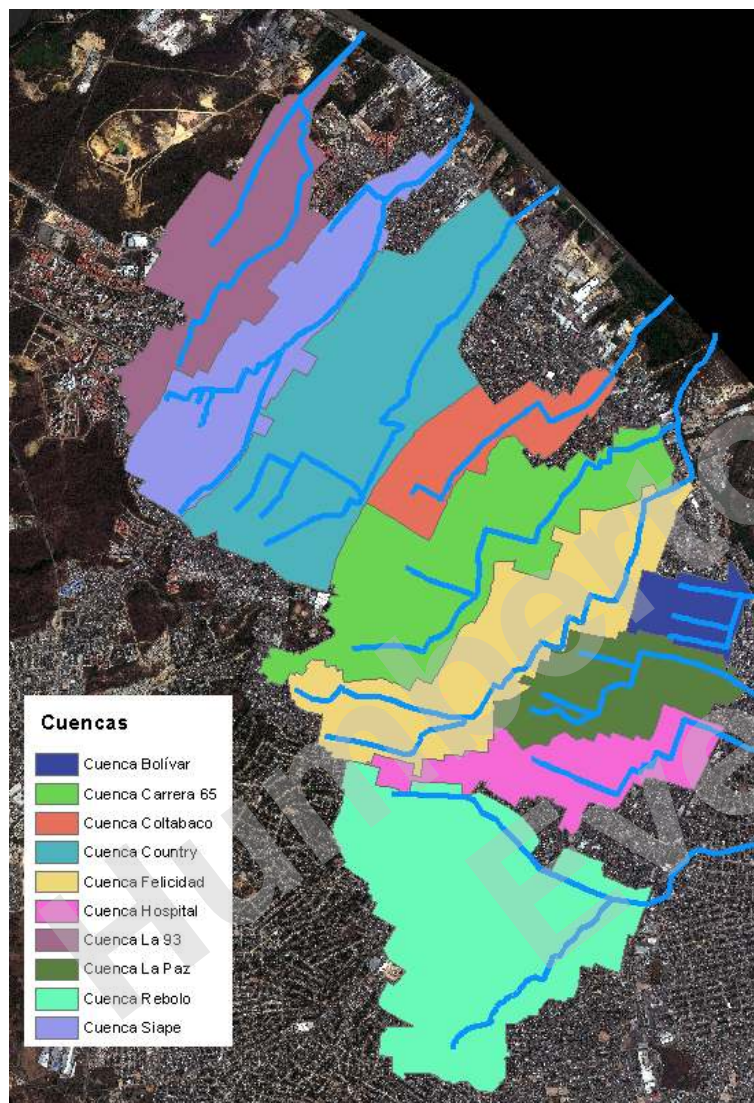


Foto: Luis Rodriguez – El Herando



Foto: www.semana.com

Canalización



Arroyo	Longitud (Km)	Costo (Millones US\$)
Arroyo 84	2.4	33,000
Arroyo 82		
Arroyo 79		
Arroyo 21	3.4	40,000
Felicidad	3.4	42,000
Calle 75 y 76	2.4	33,000
Calle 65	2.3	30,000
Hospital	2.4	30,000
Calle 91 y 92	1.5	21,000
Calle 58	0.9	15,000
Arroyo 21	3.4	40,000
TOTAL	19.7	251,000

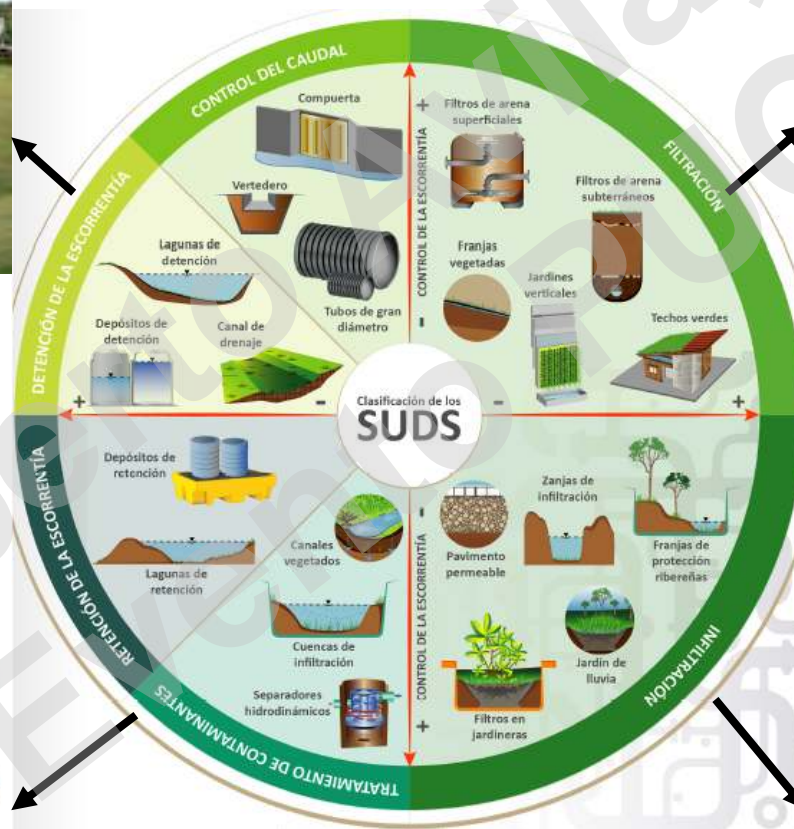
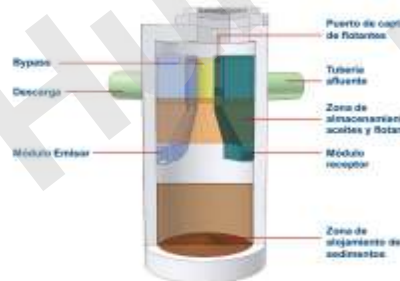
Faltarían cerca de 60 Km por canalizar. Que hacer?
MANEJO DE CUENCAS

Sistemas Urbanos de Drenaje Sostenible - SUDS



Laguna de detención

Separadores Hidrodinámicos



Techos verdes



Jardín de lluvia

Manejo de cuencas



Cahill Associate



Almacenamiento e
infiltración son
fundamentales

Configuración típica de zonas verdes en Barranquilla

Es necesario reestructurar las zonas de jardines y antejardines en la ciudad



Avila, Campello, Penela, 2013



Proyectos Piloto: Predio seleccionado

- Número de pisos: 5
- Existencia de parqueadero semi-subterráneo
- Zonas de jardín y antejardín
- Tanque para re-bombeo de aguas lluvias en zonas de parqueadero
- Dos tanques elevados para suministro de agua potable
- Un tanque subterráneo para agua potable (en desuso)



Esquema adaptación de predio



Características de drenaje de predio

Se realizaron trabajos de medición y topografía para determinar características de drenaje del predio tales como:

Área del lote: 544m²

Área de drenaje hacia tanque de almacenamiento: 273m²

Área tanque de almacenamiento: 27m²



PROYECTO PILOTO - FUNCIONAMIENTO



PROYECTO PILOTO – ADECUACIÓN JARDINES



Adaptaciones realizadas para medición



Tuberías en tanque de almacenamiento para conducción de agua hacia jardín y calle



Instalación de sensores de niveles y caudales



Construcción de jardines permeables



Construcción de registros para control de flujo de escorrentía

Resultados

EVENTO: 23 DE AGOSTO DE 2014

Escenario de almacenamiento : Vertedero de 1 cm

Precipitación acumulada : 79 mm

Volumen de escorrentía : $21,6 \text{ m}^3$

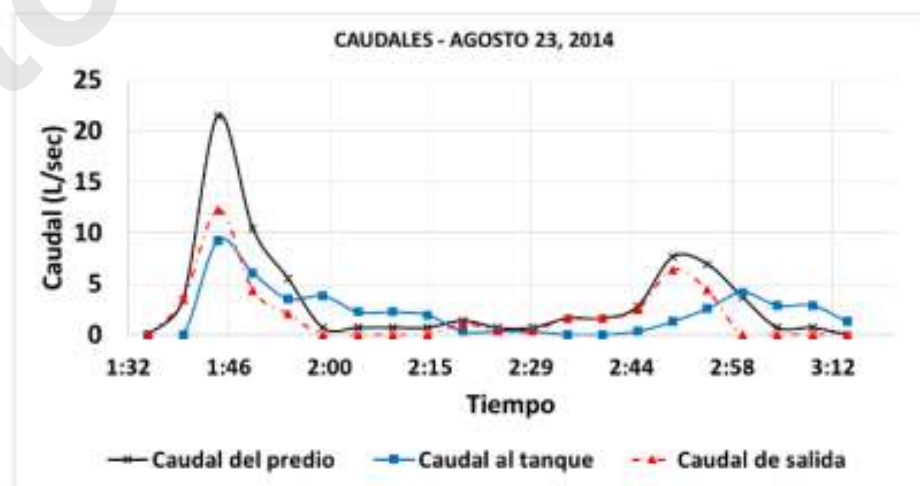
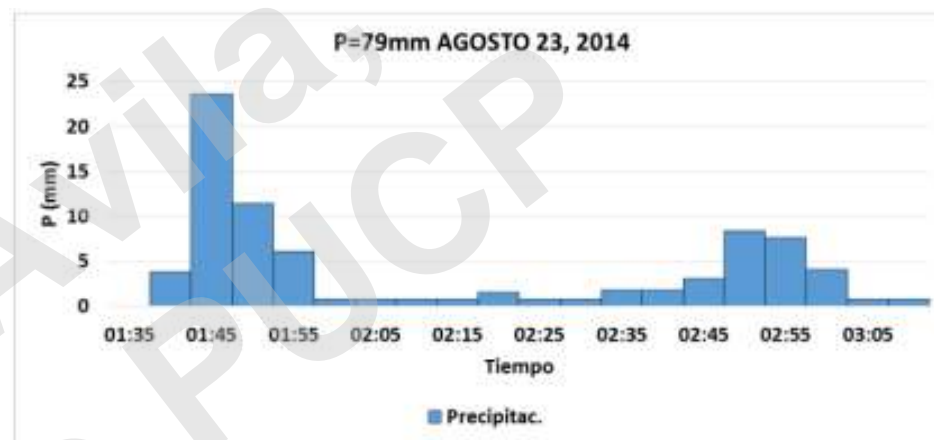
Caudal pico en predio: 21,5 L/s

Caudal pico salida a calle: 12,2 L/s

Reducción de caudal: 43%

Volumen almacenado:, $2,7 \text{ m}^3$

Reducción de volumen 13%



Resultados

Configuración	Precipitación (mm)	Volumen Total (m3)	Volumen almacenado (m3)	Reducción de volumen (%)
Bloqueo total de tubería de salida	100	27	27	100
Vertedero en entrada del tanque (1cm)	79,0	21,6	2,7	13
Vertedero en entrada del tanque (1cm)	32,5	8,9	2	22
Vertedero en tubería de salida (4cm)	43,0	11,8	4,2	36
Vertedero en tubería de salida (2cm)	19,6	5,4	0,54	10
Vertedero en tubería de salida (2cm)	163,0	44,5	13,4	30
Vertedero en tubería de salida (1cm)	14,0	3,9	1	26
Vertedero en tubería de salida (1cm)	24,0	6,7	0,91	14

Configuración	Precipitación (mm)	Caudal pico del predio (L/s)	Caudal pico de salida (L/s)	Reducción (%)
Bloqueo total de tubería de salida	100	-	-	-
Vertedero en entrada del tanque (1cm)	79	21,49	12,25	43,0
Vertedero en entrada del tanque (1cm)	32,5	14,33	5,72	60,1
Vertedero en tubería de salida (4cm)	43	15,90	15,30	3,8
Vertedero en tubería de salida (2cm)	19,6	12,71	11,76	7,5
Vertedero en tubería de salida (2cm)	163	18,49	16,26	12,1
Vertedero en tubería de salida (1cm)	14	12,71	12,71	0,0
Vertedero en tubería de salida (1cm)	24	11,56	11,24	2,8

Reducción de caudal y volumen con tanques dispersos (Volumen equivalente)

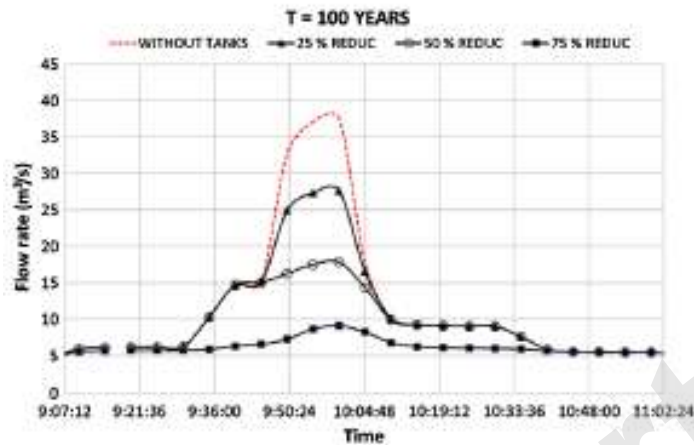


Fig. 9. Case 3: hydrographs using Type 2 storage operation

Table 10. Results of Case 3 Using for 100-Years Return Period

Variable	25% reduction	50% reduction	75% reduction	Without tanks
Peak flow (m^3/s)	19.4	12.57	6.4	25.6
Total inflow (m^3)	155,700	149,300	133,700	161,300
Runoff volume reduction (%)	3	7	17	—
Equivalent tank capacity (mm)	4.0	8.0	19	—

Avila, H., Avila, L., and Sisa, A. (2016). "Dispersed Storage as Stormwater Runoff Control in Consolidated Urban Watersheds with Flash Flood Risk." *J. Water Resour. Plann. Manage.*, [10.1061/\(ASCE\)WR.1943-5452.0000702](https://doi.org/10.1061/(ASCE)WR.1943-5452.0000702), 04016056.

Propuestas de Regulación

- **Tarifa:** Proporcional al área impermeable y aporte de escorrentía pluvial
- **Nuevas construcciones:** No pueden drenar más de lo que drena el terreno natural inicial.
- **Construcciones existentes:** Incentivo tributario o tarifario por reducción efectiva de descarga.
- Regulación para Control de Erosión en Construcciones
- Regulación sobre Calidad del Agua
- Articulación: POT-Planes Maestros de Drenaje

Control de erosión y manejo de residuos

Manejo de sedimento y basuras

Sedimentos: **CONTROL DE EROSION**

Flotantes y basuras en general

Estructuras de captura (BMPs)

Control en la fuente

Cultura ciudadana

Descargas:

Nivel de entrega: Caños del
mercado

Caudales pico: Inundaciones aguas
abajo y erosión.



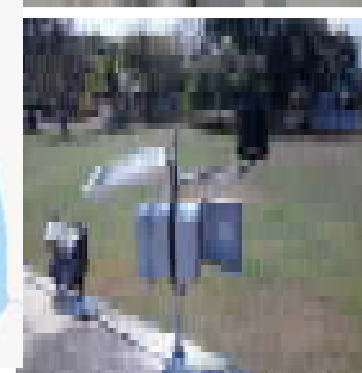
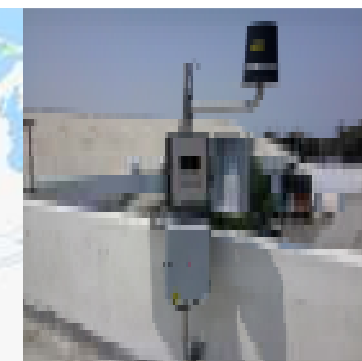
Foto: Avila, 2009



Foto: Avila, 2009

Sistema de Monitoreo y Alerta Temprana

- Desarrollo tecnológico de sistema acoplado: sensorica, transmisión de datos, manejo de datos e interfase para pluvial.co
- Desarrollo de sistema pluvial.co para uso público para la ciudad de Barranquilla
- Sistema orientado a la mitigación del riesgo por los arroyos
- www.pluvial.co

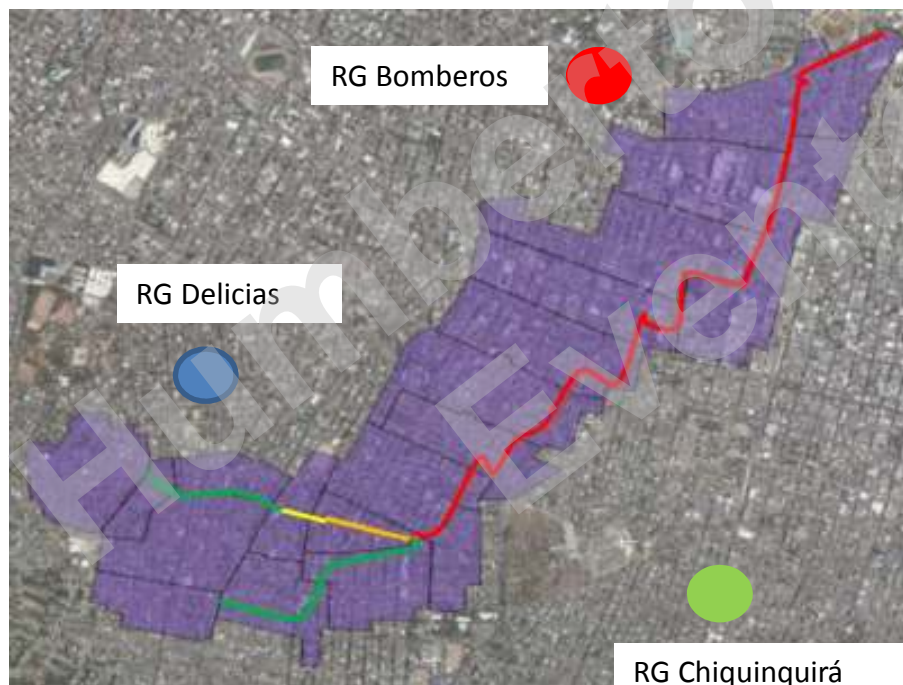


Análisis de amenaza para una tormenta real

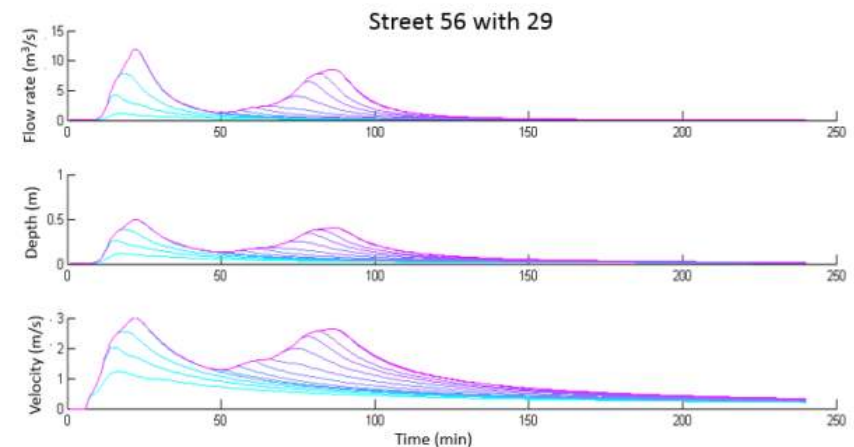
Evento del 23 de Agosto de 2014 para el Arroyo de Felicidad.

Caudal máximo en el punto de concentración 68 m³/s con una profundidad de 0.8 m y velocidades de 8.2 m/s.

La figura muestra el nivel de peligrosidad en cada calle



Rain gage	Rainfall (mm)
Delicias	36
Chiquinquirá	82
Bombero	18



Sistema Reactivo de Alerta Temprana (SRAT) (Ávila L & Ávila H). Arroyo Felicidad – Evento de August 23rd 2014.



Conclusiones

Debe prevalecer la Visión de Cuenca Urbana en los Planes Maestros de Drenaje y no solo la canalización

Se requieren mediciones y monitoreo continuo para obtener datos para calibrar modelos y mejorar la gestión de los sistemas pluviales

La ciudad de Barranquilla ha iniciado un programa importante para la canalización de tramos finales de los arroyos. Esto reducirá drásticamente el riesgo de pérdidas de vidas humanas. Queda pendiente el manejo de cuencas.

El sistema de alerta temprana se requiere para sectores no canalizados.

Muchas gracias!

Humberto Avila, PhD

Director

Instituto de Estudios Hidráulicos y Ambientales – IDEHA

Universidad del Norte

havila@uninorte.edu.co