ESCUELA SUPERIOR POLITÉCNICA DEL LITORAL
CENTRO DE INVESTIGACIÓN CIENTÍFICA Y TECNOLÓGICA

Revista Tecnológica ESPOL, Vol. xx, N. xx, pp-pp, (Mes, 200x)

Modelaje de un Sistema Urbano de Alcantarillado Pluvial en el Área de Drenaje de los Esteros Miraflores y Represado, Ciudad de Guayaquil

Danilo José Jiménez Quimiz
Facultad de Ingeniería en Ciencias de la Tierra, ESPOL
Campus Gustavo Galindo Velasco Km. 30 1/2 Vía Perimetral, (593-4) 269269, Guayaquil, Ecuador
dfjimenezq@gmail.com

Director de Tesis: David Matamoros Camposano, Ph.D., Ingeniero Civil.
Instituto de Ciencias Químicas y Ambientales, ESPOL,
Campus Gustavo Galindo Velasco Km. 30 1/2 Vía Perimetral, (593-4) 269269, Guayaquil, Ecuador
dmata@espol.edu.ec.

Resumen

La Ciudad de Guayaquil ha sufrido innumerables inundaciones en diversas ocasiones durante la época invernal. Por tal motivo, es importante realizar un diagnostico de las condiciones existentes en todos los sistemas de alcantarillado pluvial así como de sus drenajes naturales en la ciudad. El presente trabajo propone utilizar herramientas de modelaje matemático y sistemas de información geográfica para realizar dicho diagnostico. Estas herramientas son útiles para ubicar los sitios críticos de inundación los cuales son comparados con los registros históricos para proponer soluciones al problema de inundación. Adicionalmente se utilizan los hidrogramas de descarga hacia los cuerpos receptores en el modelaje de las redes de alcantarillado pluvial. Estos modelos pueden determinar los caudales reales en los sistemas de alcantarillado pluvial usando el método de aproximaciones transientes y estimaciones en tiempo real. También se puede determinar volúmenes y tiempos de descargas luego del evento de diseño en una forma inmediata. Este modelo esta basado en datos entregados por la concesionaria de agua potable International Water Services "INTERAGUA" y la Ilustre municipalidad de Guayaquil.

Palabras Claves: *Drenajes Urbanos, Estuarios, Aguas Lluvias, SWMM*

Abstract

Guayaquil City has been flooded several times during rainy season. Therefore, it is important to perform a diagnostic of existing conditions in all storm water systems in the city. Present work proposes to use mathematical model tools and geographic information systems to perform that diagnostic. These tools are useful to locate critical flooding sites which are compared to historical records to propose adequate Solutions to the flooding problem. In addition, discharge hydrograms are used in the modeling of storm water systems. These models can determine actual flows in storm water systems by using the transient approach and real time estimations. It can also immediately be determined volumes and discharge times after design event. This model is based on data supplied by INTERAGUA (International Water Services), potable water concessionary in the city, and the Municipality of Guayaquil City.

Keywords: *Urban drainages, Estuaries, Storm Water, SWMM*

1. Introducción

Según la historia, la ciudad de Santiago de Guayaquil constantemente fue relocalizada hasta que finalmente se construyó a las faldas del Cerro Santa Ana. La ciudad, desde sus inicios ha aportado al desarrollo comercial y a la economía local y nacional. Estos dos elementos de desarrollo son factores que han contribuido a su crecimiento espacial. Es así que este es interrumpido en la época invernal, ya que esta provoca inundaciones y deterioro de las vías de acceso.

El ordenamiento de las cuencas de drenaje urbanas data de tiempos históricos, siendo agravada la situación debido a que en la década de 1880, las calles estaban en un nivel inferior con respecto a las máximas mareas de los canales y sin pavimento. En esas épocas, durante las lluvias fuertes tanto los peatones como las bestias de carga se hundían en el lodo

1.1 Alcance de la Tesis.

Esta tesis propondrá una metodología de cálculo para cuantificar y ubicar los posibles focos propensos a inundaciones en áreas urbanas, para el efecto se ha escogido las cuencas de drenaje urbana perteneciente al Estero Miraflores y Represado, basándose en modelos matemáticos y sistemas de información geográfica (SIG).

Esta tesis ayudara a que otros estudios realicen un análisis de cuantificación de daños de inundación y un análisis para mitigar estos daños.

2. Objetivos.

Plantear nuevas alternativas de diseño basados en modelos matemáticos de alcantarillado pluvial, determinar en donde se producen los sitios críticos de inundación por topografía o por fallos del sistema de alcantarillado pluvial.

2.1. Estructura de la tesis.

En el capitulo uno se encuentran descritos los objetivos, alcance y la justificación de esta tesis de grado. Se describe como se propone ampliar el conocimiento en los métodos matemáticos para la modelación de drenaje de aguas lluvias y demostrar que estos son de gran ayuda en la toma de decisiones a corto y largo plazo.

En el capitulo dos se hace una descripción de la literatura revisada y de los métodos teóricos e informáticos utilizados para el diseño y análisis de los sistemas de aguas lluvias. Además se describe la problemática de los sistemas de drenaje de la ciudad de Guayaquil y las conclusiones de los estudios y planes maestros de drenaje pluvial.

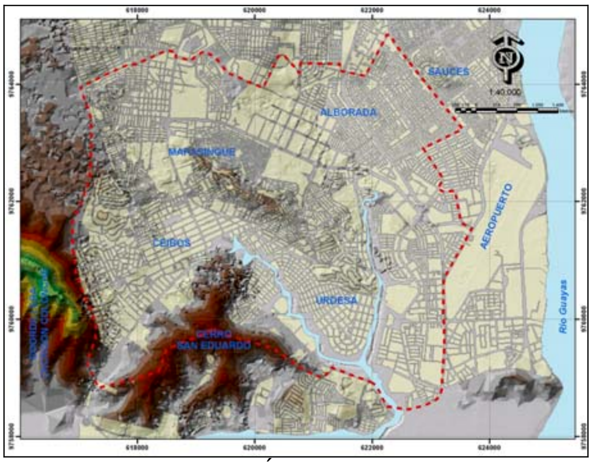

Figura 1. Área de Estudio.

Seguido de esto en el capitulo tres se describe las fuentes y el origen de la información topográfica, pluvial, caudales en las descargas, precipitación, mareas, usos y tipos de suelo los cuales alimentaran al modelo de drenaje. Además se describe las campañas de campo realizadas para determinar las cotas y caudales en las descargas de aguas lluvias.

En el capitulo cuatro se analizan cada uno de los modelos utilizados para este fin y se realiza un balance en ellos y determinamos con cual trabajar. A continuación realizamos una descripción del modelo electo y de la forma en que se ingresan los parámetros de entrada. Asimismo se realizara un análisis de sensibilidad para determinar el o los parámetros que afectan significativamente al modelo y terminar con su respectiva calibración.

Luego de esto analizaremos los posibles problemas de inundación que se presentan en la cuenca de estudio y estudiaremos las posibles soluciones para evitar o minimizar dichos problemas. De las obras civiles (soluciones) seccionadas realizaremos un análisis de costos no muy detallado ya que este no es el alcance de esta tesis.

En el capitulo cinco se darán las conclusiones y recomendaciones de las obras seleccionas

2.2. Revisión de la literatura.

Se reviso toda la información existente referente a aguas lluvias, que pertenece a International Water

Services (INTERAGUA). Para tal efecto esta fue cedida bajo pedido y autorización del Ing. Ivon Melliger (Gerente General de Interagua, 2006). Los datos de mediciones pluviométricas fueron obtenidos del INAMHI y AQUATEC.S.A.

Adicionalmente se realizo una medición exhaustiva de la bibliografía en temas de sistemas de aguas lluvias.

Figura 2. Inundación provocada por el fenómeno del niño (Alborada 10ma Etapa) Fuente Diario el Universo, 1997

2.3. Métodos teóricos para diseñar sistemas de aguas lluvias.

Los diseños hidráulicos en tuberías son calculados con la ecuación de manning, los tiempos de concentración característicos del sector de estudio, continuación se muestran las formulas que comúnmente se usan en estos diseños.

$$Q = A * V$$

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

$$Tc = \left(\frac{0.871 * L^3}{H} \right)^{0.385} * 60$$

Q: Caudal en (m3/s)
V: Velocidad (m/s)
S: Pendiente (m/m)
R: Radio Hidráulico (m2)
L: Longitud del cauce principal en (Km)
H: Desnivel entre cabecera y descarga (m)

2.4. Métodos informáticos aplicados al diseño de aguas lluvias

Anteriormente, los cálculos para la implementación y corrección de sistemas de alcantarillado pluvial eran realizados con la utilización de reglas de cálculos y tablas en Excel, en donde se hacían iteraciones simultáneas. Este trabajo era muy largo y a veces complicado. La utilización de modelos matemáticos en la ingeniería sanitaria ayuda a que los cambios en los sistemas de drenajes sean resueltos de una manera más rápida y confiable.

Actualmente existen varios programas que modelan sistemas de aguas lluvias uno de ellos es StormCad que es un programa perteneciente a la Haestad (Ver www.haestad.com, este programa no incluye el efecto de la marea en los sistemas de drenaje.

Otro modelo es Storm Water Management Model (SWMM), programa perteneciente a la Agencia de Protección de Medio Ambiente (EPA). Este programa si bien no es muy amigable con otros programas como por ejemplo autocad si involucra el efecto de la marea. Y es el que utilizaremos para la presente tesis. (Ver www.epa.com)

Estos modelos son alimentados por una serie de parámetros como: Infiltración, Pendiente, Coeficiente de manning, permeabilidad, impermeabilidad, ancho de la cuenca diámetros de tubos y características de canales y ductos, de todos estos coeficientes se discutirá con detalle en los capítulos siguientes.

3. Recopilación de la Información

La información para esta tesis fue cedida por Interagua y por Aquatec. S.A. En la base geográfica de Interagua, en el área de estudio existen aproximadamente 126.5 km de tuberías de alcantarillado pluvial que fluctúan en diámetros de 8 pulg a 78 pulg. La longitud total de los canales en de 12.4 km y de los ductos cajón es de 14.0 km. Ver Tabla.

Tabla 1. Tuberías por diámetro en el área de estudio

	Longitud de Tuberías (m)	Longitud de Ductos Cajón (m)	Longitud de Canales (m)
Total	**126,462.00**	**14,041.00**	**12,440.00**

3.1. Información Pluviométrica.

De la estación Pluviométrica ubicada en el aeropuerto Simón Bolívar de la ciudad de Guayaquil, se obtuvieron datos de precipitaciones anuales pluviométricas, con un periodo de registro de cincuenta y cinco años (1945-2002). En el periodo de registro se ha obtenido el promedio anual de precipitación pluvial de 1010 mm por año. El año más lluvioso ocurrió en 1983, registrándose una precipitación de 3850 mm; el año más seco fue en 1985 con una precipitación de 340 mm

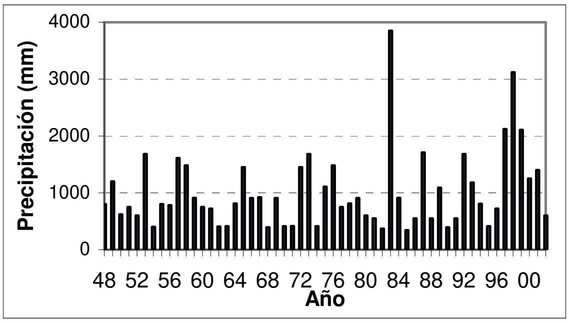

Figura 3. Precipitación Anual Histórica Estación Aeropuerto de Guayaquil**.**

Los datos históricos de lluvia y la curva de intensidad duración frecuencia generada por la Universidad Católica en lo que fue el (Plan Emergente de Drenaje Pluvial), fueron utilizados para seleccionar los eventos de diseño que permiten evaluar el desempeño del sistema ante eventos con periodos de retorno específicos, para periodos de retorno de 2 y 5 años.

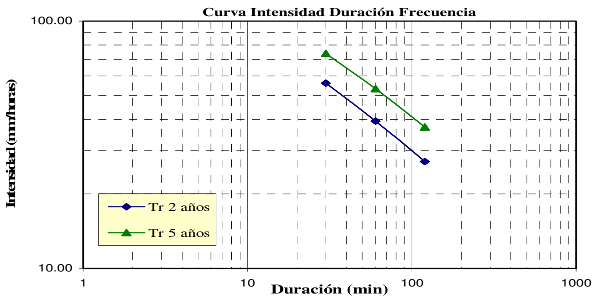

Figura 4. Curva Intensidad Duración Frecuencia.

3.2. Información de Mareas

El cauce del Río Guayas está a una cota mayor que el Estero Salado, pues éste se encuentra cercano al nivel del mar. Por sus características geomorfológicas, y por la falta de contribuyentes, el Estero Salado no tiene la dinámica hidráulica que posee el Río Guayas.

Para el estudio se realizaron mediciones en el río Daule, a la altura del sector denominado Malecón 2000, la Aurora y la Toma de Agua potable.

Los cuerpos receptores del sistema de drenaje de Guayaquil son altamente afectados por las mareas. La fuerza principal de la marea que actúa en el Golfo de Guayaquil corresponde a la componente armónica semidiurna m = 12.42 horas, la cual se debe a la atracción gravitacional de la luna; por tanto, se obtienen dos ciclos de marea cada día lunar, es decir, dos pleamares y dos bajamares cada 24.8 horas.

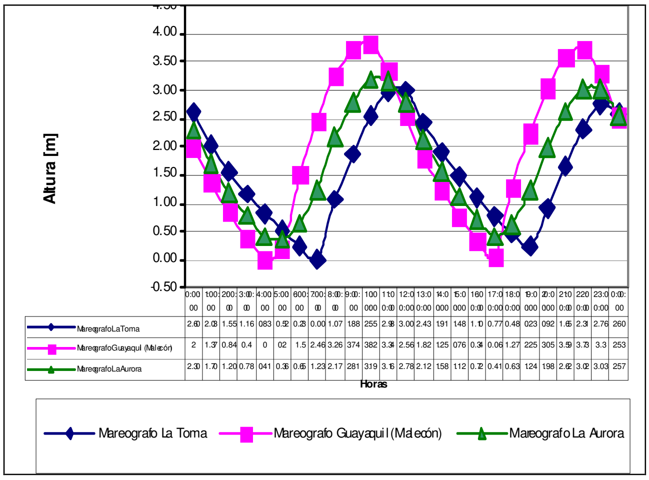

Figura 5. Curvas de Marea

3.3. Usos de Suelo

En área de estudio témenos cinco usos de suelos como son: Uso residencial, densidad baja, Uso residencial densidad alta, Uso de comercio y de servicio, Uso industrial, Uso de equipamiento urbano.

Estos usos de suelos serán los considerados para el cálculo de la escorrentía de aguas lluvias, de estos obtendremos factores que serán discutidos en el capitulo siguiente, dichos factores alimentaran al modelo matemático.

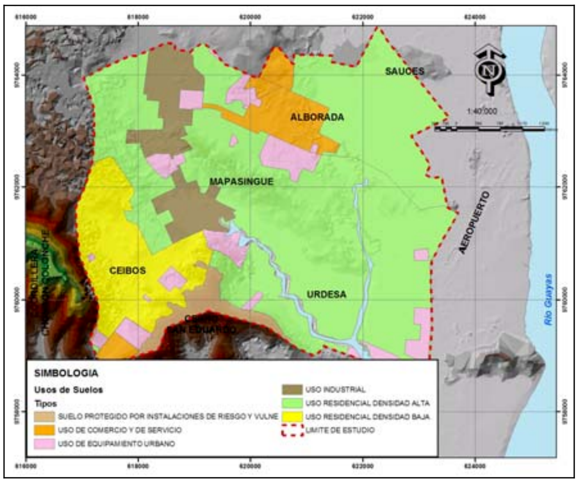

Figura 6. Usos de Suelo.

3.4. Topografía

Las curvas de nivel fueron generadas de la información topográfica cedida por Interagua y otra proporcionada por la ilustre municipalidad del Guayaquil. Esta información es actualizada tipo planimétrica y se presenta como "Latitud, Longitud, Elevación", estos puntos se encuentran sobre los pozos de inspección (manholes) de aguas lluvias y en cada esquina de las manzanas de la ciudad. Las curvas de nivel fueron generadas por el programa CivilCad 2004 con un intervalo de 5mts mediante el proceso de triangulación.

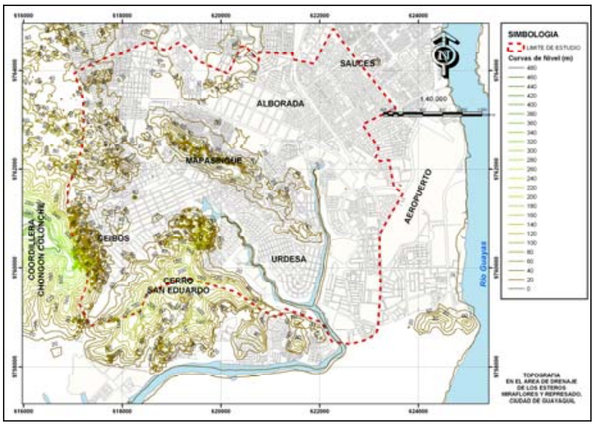

Figura 7. Topografia.

3.5. Cuencas de drenaje

Las cuencas en estudio en la presente tesis se encuentran al norte de la ciudad cubren ciudadelas tales como: Urdesa Central, Urdenor, Ceibos, Ceibos Norte, El Paraíso, Miraflores, Alborada, Ietel, Kennedy, Mapasingue, Prosperita, Lomas de la Prosperina y ciudadela Universitaria.

El área analizada es de 3,184ha, que representa dos cuencas. La división se la realizo siguiendo las curvas de nivel y la configuración de las red de drenaje de aguas lluvias, esta red natural consta principalmente de dos esteros a los que se los conoce son el nombre de Miraflores el cual se encuentra hacia el sur y el otro Represado el cual se encuentra al norte. Las cuencas toman el nombre de dichos esteros.

Se contabilizaron 22 descargas hacia el estero Miraflores y 28 descargas hacia el estero Represado.

4. Uso del Modelo SWMM.

El programa utilizado para la simulación del sistema de drenaje es el Storm Water Management Model (SWMM) Versión 5, desarrollado por la US Environmental Protection Agency de Licencia Libre. El SWMM es un modelo de simulación de precipitación y escorrentía usado para simular la cantidad y calidad del escurrimiento en zonas urbanas para eventos simples de precipitación. El modelo está compuesto de diferentes módulos ("Blocks") que permiten simular las diferentes etapas del escurrimiento, transporte, almacenamiento y tratamiento de las aguas lluvias. Para el modelo de la ciudad de Guayaquil se utilizaron los módulos RUNOFF y EXTRAN.

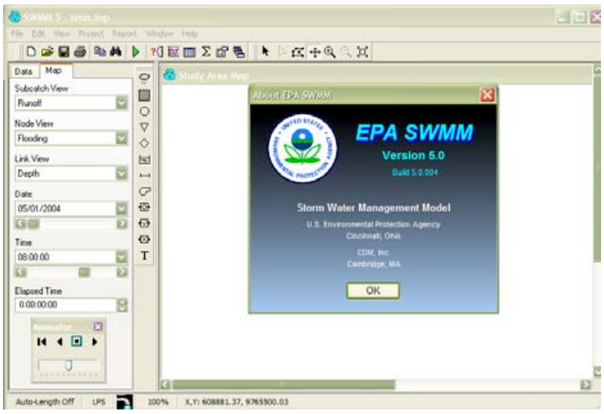

Figura 8. Software SWMM.

4.1. Características de la modelación hidrológica

El SWMM cuenta con varios procesos hidrológicos que producen el escurrimiento para zonas urbanas exclusivamente.

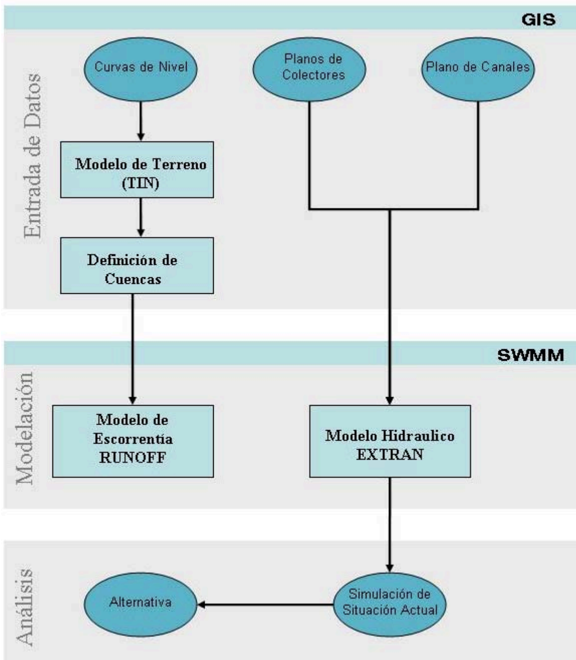

Figura 9. Datos Modelo SWMM.

. Estos incluyen: Lluvia variable en el tiempo, Evaporación desde superficies de agua, Intercepción de la lluvia en depresiones, Infiltración de la lluvia en las capas superiores de suelo, La percolación del agua infiltrada hacia capas acuíferas, Interflujo entre el acuífero y el sistema de transporte, Tránsito no lineal de la onda cinemática de la escorrentía superficial.

4.2. Áreas de Aportación.

El área de aportación de cada una de las cámaras de aguas lluvias se generó en base a las cotas de terreno observando su drenabilidad al punto más bajo de éstas el cual tiene su fin en una cámara de aguas lluvias. Estas áreas fueron generadas una a una en Autocad. Las áreas de aportación tienen un promedio 2.5 Ha

4.3. Número de Curva (CN)

Los agradecimientos pueden ser hechos a instituciones o individuos, los cuales no han sido referenciados en el artículo, y que han hecho una importante contribución en el desarrollo del trabajo. Se recomienda que este apartado sea incluido justo antes de la sección de referencias. Ver Tabla

Tabla 2. Grupo hidrológico para uso de suelo.

Uso del Suelo			Grupo Hidrológico del Suelo			
			A	B	C	D
Praderas			30	58	71	78
Bosques	Cubierta pobre		45	66	77	83
	Cubierta buena		25	55	70	77
Espacios abiertos: con césped, parques, campos de golf, cementerios, etc.	Buena condición: cubierta de pastos sobre más del 75% del área		39	61	74	80
	Condición aceptable: cubierta de pastos sobre el 50 a 75% del área		49	69	79	84
Áreas comerciales y de tiendas (85% impermeable)			89	92	94	95
Zonas industriales (75% impermeable)			81	88	91	93
Zonas Residenciales	Tamaño medio de la parcela (m2)	Promedio de % impermeable				
	500	65	77	85	90	92
	1000	38	61	75	83	87
	1350	30	57	72	81	86
	2000	25	54	70	80	85
	4000	20	51	68	79	84
Tejados, parkings, superficies impermeables en general			98	98	98	98
Calles y carreteras	Pavimentadas, con bordillos y bocas de tormenta		98	98	98	98
	De grava		76	85	89	91
	De tierra		72	82	87	89

***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 alto contenido de arcilla.*
***Grupo D:** Suelos expansivos, arcillas altamente plásticas.*

4.4. Pendientes.

Para estimar la pendiente en cada área de aportación se utilizó un modelo digital de terreno (MDT), el cual dio mejores resultados en la generación de dichas pendientes. El MDT fue construido en base a la información topográfica obtenida por medio de la Municipalidad de la ciudad de Guayaquil.

4.5. Coeficientes de Impermeabilidad.

En esta tabla se muestran porcentajes efectivos de impermeabilidad para diferentes usos de suelo. Estos coeficientes fueron añadidos a cada una de las manzanas y calles, tanto para la zona dentro del área de estudio

Tabla 3. Coeficientes de Impermeabilidad.

Descripcion Uso de Suelo	Porcentaje Impermeable Efectivo
Zona Residencial Baja Densidad	30
Zona Residencial Mediana Densidad	40
Zona Residencial Alta Densidad	70
Tiendas	90
Zona Comercial	90
Zona Industrial	85
Areas Publicas	50
Parques	5
Espacios Abiertos	2
Pastizales	2

5. Análisis de Sensibilidad.

El objetivo del análisis de sensibilidad es el de evaluar el comportamiento del modelo hidráulico al variar los parámetros individualmente y para un evento de lluvia especifico. Con esto se busca identificar los parámetros que controlan el comportamiento del modelo (mayor incidencia en los hidrogramas de descarga) o los parámetros que son irrelevantes para el proceso de calibración.

Se realizó el análisis de sensibilidad en los modelos de las cuencas de los esteros Miraflores y Represado con los periodos de lluvia correspondientes a los días 12 y 20 de Abril del 2005. En esta fecha se ubicaron los equipos pluviométricos y los correntometros, De los pluviómetros se escogió la información del pluviómetro ubicado en el edificio actualmente llamado INMARAL-SALUD ubicado en la Av. Carlos Julio Arosemena junto al colegio 24 de Mayo.

A cada una de las variables se las afectó con decaimientos y crecimiento de porcentajes en las variables de entrada en el orden del -50%, -25%, +25% y +50%. Se analizaron los coeficientes o variables más importantes en los modelos de escorrentía urbana, que analizaremos son los siguientes:

WIDHT (ancho de área de aportación)

N PERV (coeficiente de manning para área permeable)
N IMPERV (coeficiente de manning para área impermeable)
PCNT IMPERV (porcentaje de área impermeable)
PCNT SLOPE (pendiente promedio)

No se analizaran los otros coeficientes ya que aquellos corresponden a propiedades físicas del sistema que no pueden variar como: Longitud, Diámetro, Cotas de Terreno, Pendientes, Cotas de Invert, Profundidad de Pozos.

5.1. Proceso de Calibración

Para el proceso de calibración se ajustaron principalmente los tres parámetros más sensibles según los resultados del análisis de sensibilidad:

Porcentaje de área impermeable
Ancho del área de aportación
Número de Manning de área impermeable

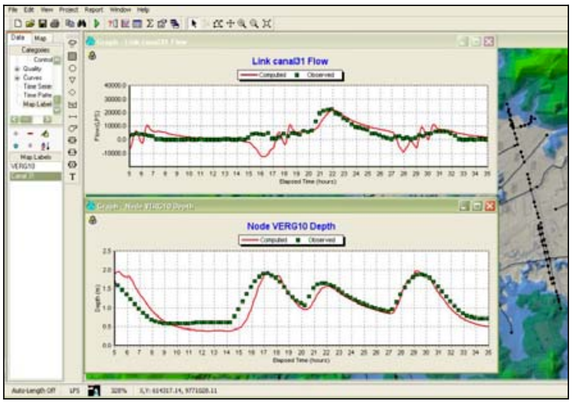

Figura 10. Modelo Calibrado.

Ajuste de los valores medidos versus los modelados para el canal 31 el cual esta junto a la Urbanización Urdenor (Junto a la Empresa Colimpo), el error residual RD muestra que el ajuste es totalmente satisfactorio para los propósitos de la calibración, ya que cuando este valor tiende a (0.0) es desfavorable, mientas que cuando este valor tiende a (1.0) es satisfactorio.

Es de entender que esta correlación lineal es para el instante que comienza la lluvia. La eficiencia del modelo es calculada según el "coeficiente de eficiencia" (E): desarrollado por Nash y Sutcliffe en (1970) con rasgos mínimos infinitos (pobre aproximación) a 1.0 (buena aproximación).

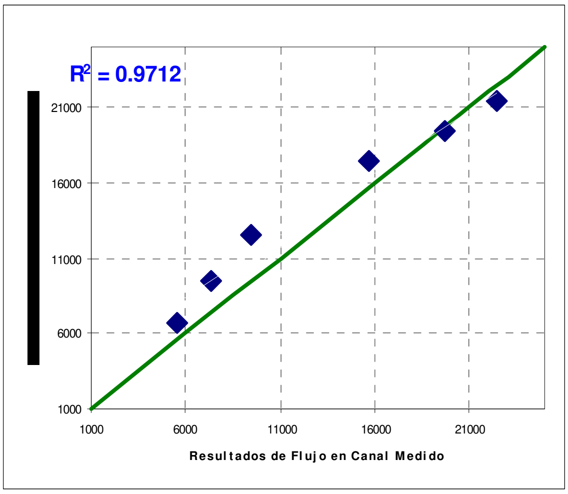

Figura 11. Ajuste Lineal.

6. Conclusiones y Recomendaciones.

De todo este análisis cuantitativo, se pude concluir que el sistema de alcantarillado de drenaje pluvial esta colapsado, y que las herramientas de modelación de redes de drenaje tienen mucha aplicación y es necesaria su utilización para ubicar focos probables de inundación, para luego mitigar el impacto. Es así que esta herramienta ¨SWMM¨ es utilizada en países de primer mundo.

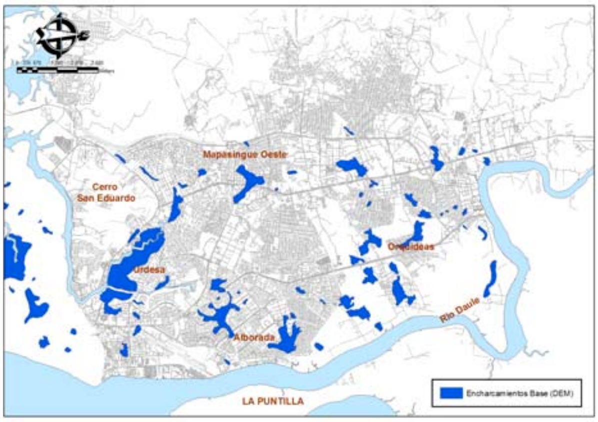

Figura 10. Resultado de Áreas Inundables.

Al comparar las áreas de encharcamientos con las áreas de inundación registradas por la Muy Ilustre Municipalidad de Guayaquil, nos damos cuenta que existe mucha similitud, y que es necesario realizar un realizar un cálculo exacto de las alturas de inundación con la ayuda de una buena topografía del sitio de inundación y un cálculo de daños materiales producto de estas inundaciones. Además es necesaria la conexión entre sistemas de cuencas de tal manera que se aumente la capacidad de retención de aguas lluvias dentro de los sistemas de drenaje.

Recomendaciones. Determinar posibles soluciones, como las siguientes:

1. Almacenamientos que controlen los picos de caudal que se producen en una lluvia de magnitud elevada.
2. Construcción de canales de pie de talud, para evitar el ingreso de sedimentos a los sistemas de alcantarillado pluvial.
3. Instalación de válvulas de retención de flujo en las salidas a los cuerpos receptores.
4. Disminución de la amplitud de la curva de marea para evitar el ingreso de agua a los sistemas de alcantarillado pluvial.

7. Calculo de Inundación por deshielo.

Como es de conocimiento global el fenómeno del deshielo en los polos es cada vez real debido al calentamiento global producto de las continuas emisiones de gases que destruyen la capa de ozono, esto acompañado de la quema y tala de grandes extensiones de bosque.

Debido a esto se ha realizado un análisis de la inundación que afectaría a la Ciudad de Guayaquil si los niveles de marea comenzaran a subir, continuación se muestran figuras de este fenómeno. Para logar estas imágenes se integrado la información Topográfica del Instituto Geográfico militar (IGM) y la Información batimétrica levantada por INTERAGUA, 2005.

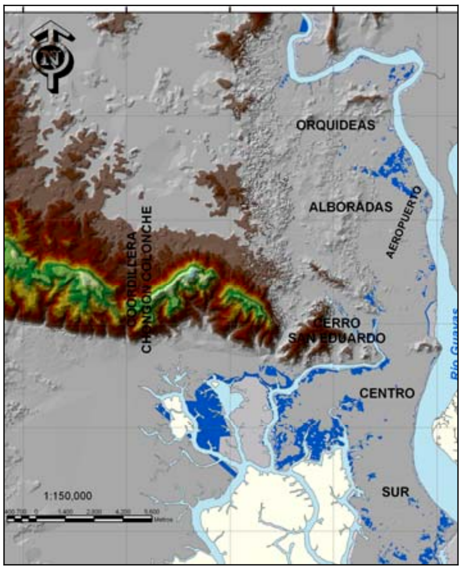

Figura 11. Elevación de 1.00m en el nivel máximo de la marea.

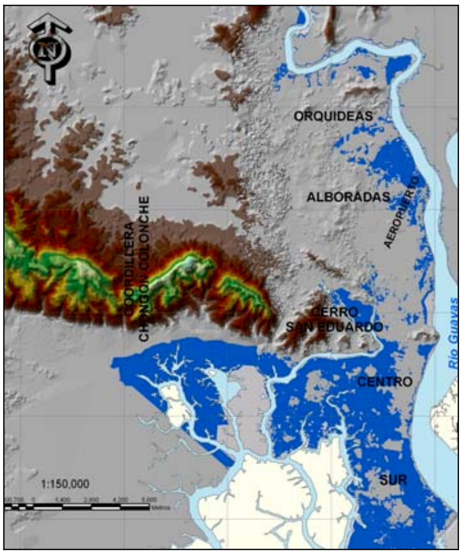

Figura 11. Elevación de 1.50m en el nivel máximo de la marea.

8. Referencias.

[1] CEDEGE 1997, Diagnóstico de Control de Inundaciones en la Cuenca Baja del Río Guayas.
[2] Departamento de Ingeniería Hidráulica y Medio Ambiente (Universidad Politécnica de Valencia).
[3] Información INAMHI .
[4] Información IGM.
[5] Subramanya, K. Engineering Hydrology. Mc Graw Hill, New Delhi, 1991.
[6] V.M. "Engineering Hydrology". Ed. Prentice Hall. 1989.
[7] Ven Te Chow, Hidrología Aplicado.
[8] Estudios de Inundación Realizados por la Universidad Católica de Guayaquil, 1990
[9] Plan Maestro de Drenaje Pluvial para International Water Services (Interagua),2004