

Modelación y desarrollo de una base de datos espaciales del sistema de drenaje pluvial urbano de la ciudad de Coro

INTRODUCCIÓN

En la Ciudad de Coro, el mantenimiento y crecimiento de la red de drenaje consume todos los años un porcentaje apreciable del presupuesto municipal. Aunado a esto, la falta de planificación, control y seguimiento de la infraestructura de drenaje hace que cada vez los sistemas y las gestiones fracasen. En el caso particular de la Ciudad de Coro, la municipalidad no cuenta con una herramienta que les permita manejar la gran cantidad de información hidrológica y estructural del Sistema de Drenaje Urbano existente. La escasa sistematización de la información y el grado de dispersión de la misma, hace imposible su gestión mediante procedimientos tradicionales. (Gómez et al. 2009), afirma que la forma más económica y rápida de abordar la solución de esos problemas es con ayuda de un modelo numérico de simulación de la realidad de la cuenca urbana y su red de drenaje. Para lograr esto, a diferencia de la gestión de inundaciones de origen fluvial, en los problemas de drenaje pluvial urbano se necesita también el disponer de un inventario de la infraestructura existente para la gestión y planificación de las redes de servicio, zonas de esparcimiento, áreas comerciales e industriales y expansión urbana, por lo tanto, las herramientas informáticas para la gestión de esta base de datos espaciales debe permitir tales tareas (McKinney et al. 1992).

Existen diferentes herramientas para gestionar y modelar el funcionamiento de un Sistema de Drenaje Pluvial Urbano (SDPU), en tal sentido, los SIG, por su capacidad de integración y análisis de información proveniente de distintas fuentes, es una de ellas. El uso de este tipo de herramientas informáticas en este campo, se ha limitado exclusivamente a los paquetes comerciales incluso en los casos donde se utiliza el modelo matemático SWMM

Resumen / Abstract

En este trabajo se presenta una breve recopilación del estado del arte y perspectivas futuras de las herramientas computacionales destinadas a la evaluación de un Sistema de Drenaje Pluvial Urbano (SDPU). Se desarrolla la propuesta de un sistema de modelación basado en la aplicación de herramientas informáticas representadas por los Sistemas de Información Geográfica (SIG) y unos modelos de simulación integrados. En el artículo, se presenta la base de datos espaciales del SDPU de Coro capital del Estado Falcón (pre- procesamiento), y adicionalmente, se muestran los resultados obtenidos al aplicar la herramienta en el análisis de inundaciones pluviales de un subsistema de drenaje superficial localizado al Este de la Ciudad.

Palabras clave: base de datos espaciales, drenaje pluvial, inundaciones urbanas.

This paper presents a brief compilation of the state of art and future advances with regard to computational tools aimed at evaluation of an Urban Stormwater System. It also develops a proposal based on advanced urban flood modeling system by integrating the information in a Geographic Information System (GIS) with integrated simulation models. This work aims at presenting the GIS database of Coro Stormwater System, and also shows some results obtained by applying the tool to a major pluvial drainage system located East of the City. Finally, it is expected that this tool, incorporating GIS technologies, is able to create a logical and centralized database which also serves as input data for mathematical models.

Keywords: GIS, database, urban stormwater system, urban floods.

Luis Alejandro Sánchez, CIDRHI. Univ. Nac. Experimental Francisco de Miranda, Falcón, Venezuela

e-mail: luisanchezr@yahoo.com

Luisana Sahyris Méndez Escalante, CIDRHI. Univ. Nac. Experimental Francisco de Miranda, Falcón, Venezuela

e-mail: mendezluisana@gmail.com

como motor de cálculo para la modelación (Barber et al. 1994).

Un estudio comparativo realizado por el autor de los planes directores de drenaje, entre municipalidades en países de América latina y algunas ciudades de países industrializados, permitió constatar que en general, algunos países latinoamericanos todavía predomina el enfoque tradicional, es decir, Método Racional para la estimación de la escorrentía y la Ecuación de Manning para el tránsito en los conductos, sin contemplar, las técnicas de análisis que permiten modelar el comportamiento real del sistema, en régimen no uniforme y no permanente. La tendencia general en lo que respecta a las técnicas de análisis actuales empleadas tanto para el diseño como para la evaluación, está orientada hacia los modelos matemáticos integrados. Los modelos integrados incluyen dos componentes vinculados: el Modelo hidrológico y el hidráulico. El primero orientado a modelar procesos de baja escala como almacenamiento en depresiones, Intercepción, y el flujo sobre superficies impermeables en áreas urbanas con delgadas capas de suelo y baja capacidad de infiltración. En cambio, el componente de simulación hidráulica se ha caracterizado por la utilización de modelos de tipo Simplificado por ejemplo la aproximación de la onda cinemática o Completo en el cual se resuelven completamente las ecuaciones de Saint Venant.

En este trabajo, se presenta una propuesta basada en el uso de herramientas SIG en la preparación de la información básica de entrada al modelo y en la construcción de la infraestructura de datos espaciales así como los Modelos de Simulación Integrados que facilitan el manejo y tratamiento de la información espacial geo-referenciada y sus características descriptivas como apoyo al análisis y evaluación de la infraestructura de drenaje pluvial urbano, aprovechando al máximo las herramientas informáticas de fácil acceso en especial las de dominio público como el modelo integrado EPA-SWMM. Los modelos más conocidos para drenaje urbano son el MOUSE (En Europa) y el SWMM (América), sin embargo el SWMM a diferencia del MOUSE es de acceso público. Cabe destacar que el modelo EPA SWMM 5.0 no tiene una integración directa con SIG, no obstante, existen diversas empresas comerciales que tienen softwares de cálculo hidrológico e hidráulico que utilizan como motor de cálculo a SWMM 5.0 y que además tienen integración con SIG, entre ellos: PCSWMM.NET, MIKE SWMM, INFOSWMM, MHWSoft, AGSWMM, SWMM CONNECT y el XPSWMM (Sánchez 2008).

La vinculación SIG-Modelo Integrado está orientada hacia dos objetivos centrales, uno de ellos es emplearlo para el pre-procesamiento de la información requerida por el modelo SWMM el cual será utilizado para cuantificar el riesgo asociado a las inundaciones urbanas y el otro, para

manipular una base de datos histórica con todos los atributos de las cuencas urbanas y la ubicación y caracterización exacta de cada uno de los componentes del sistema.

El trabajo muestra además una breve recopilación del estado del arte sobre las herramientas computacionales para la gestión de inundaciones pluviales urbanas, y presenta los resultados obtenidos de la aplicación de esta tecnología en un caso de estudio del Sistema de Drenaje de Coro. Este proyecto se encuentra en desarrollo, por tanto, el caso de aplicación se circunscribe a una parte del SDPU de la Ciudad de Coro en el Estado Falcón, Venezuela y solo se incluyen los métodos para el pre-procesamiento de la información de entrada, sin embargo, la investigación también prevé el tratamiento espacial de las salidas del modelo matemático utilizando el SIG. Los objetivos del artículo son:

- Presentar la base de datos espaciales del SDPU en el sector oeste de la Ciudad de Coro soportado en plataforma SIG.
- Mostrar los resultados obtenidos al aplicar la herramienta en el análisis de inundaciones pluviales de un Sub-sistema de drenaje superficial en la Ciudad de Coro.

Tendencias en el análisis de Sistemas de Drenaje Pluvial Urbano

Una revisión general de la evolución histórica en el desarrollo de los modelos para el análisis y diseño de infraestructura de drenaje pluvial en ambientes urbanos, permite afirmar que el avance ha sido desigual en diferentes países o regiones. Los modelos hidrológicos más potentes, han ido mejorando su campo de aplicación enfocándose en la simulación del transporte de la escorrentía superficial para estimar la producción y evolución de cargas contaminantes asociadas a dicha escorrentía. En general, los modelos han sido ampliamente usados en el campo de la Ingeniería y su complejidad ha aumentado a medida que se descubren nuevas herramientas computacionales para resolver con rapidez las ecuaciones matemáticas representativas de fenómenos físicos determinados. (Riccardi 2001), afirma que en la actualidad las mayores limitaciones en el modelado hidrológico-hidráulico de los procesos lluvia-escorrentía están vinculados a insuficiencia de datos, especialmente en países en desarrollo. En el caso de Venezuela, la aplicación se ha centrado en mayor medida en el diseño y dimensionamiento de componentes de la redes de drenaje para prevenir inundaciones en el medio urbano y en menor medida en como herramienta para la planificación del crecimiento urbano en las grandes ciudades.

Uno de los aspectos que diferencia el análisis de los procesos hidrológicos lluvia-escorrentía en ambientes rurales con los ambientes urbanos, tiene que ver con la escala de estudio y la consideración de procesos

hidrológicos e hidráulicos predominantes. (Achleitner 2006).

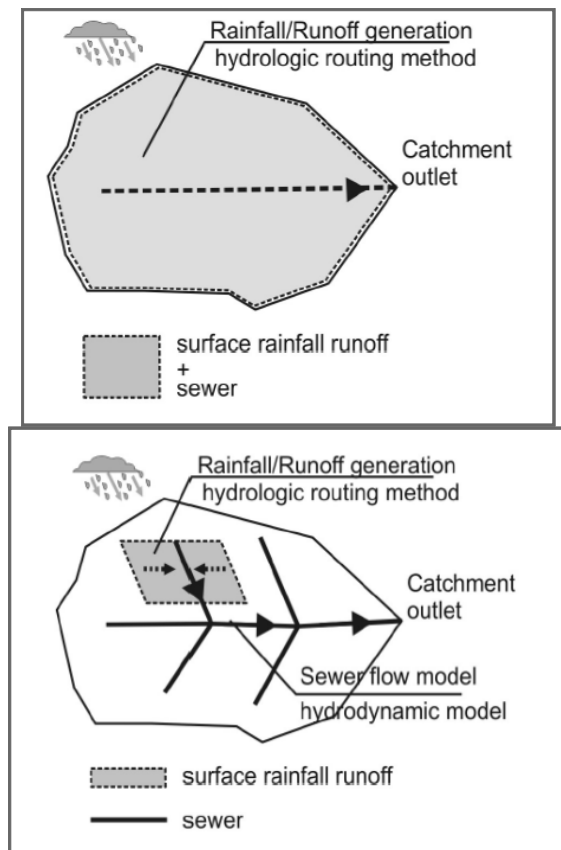


Figura N°1. Stefan Achleitner (2006), "Modular conceptual modelling in urban drainage development and application of city drain", Innsbruck, Austria

El alto nivel de detalle, que requiere la simulación del movimiento del agua en ambientes urbanos, ha sido estudiado ampliamente (Zaghloul 1983), (Maksimovic 2001), (García et al. 2004). A criterio del autor, los resultados obtenidos por estos investigadores están enfocados a analizar solo el grado de discretización, y no dejan claro los criterios óptimos que el modelador debe asumir para dicha discretización. El efecto de escala sobre la simulación del Flujo de Agua Superficial en Áreas Urbanas usando modelos basados en la Onda Cinemática fue estudiada por (Pedraza 2006), en este trabajo se desarrolló un proceso de agregación espacial aplicable solo a cuencas urbanas pequeñas, en el que se demostró que en este tipo de cuencas el efecto del flujo superficial predomina sobre el efecto del flujo en cauces y para escalas mayores, el proceso dominante corresponde al efecto del flujo en cauces por encima de el efecto del flujo superficial, por lo que la respuesta hidrológica pasa a depender más de los parámetros geométricos e hidráulicos de la red de drenaje.

Las primeras investigaciones orientadas a la evalua-

ción integral de modelos y a analizar los progresos científicos en la modelación Hidrológica en cuencas urbanas, fueron presentadas por (Papadakis et al. 1973); (Marsalek et al. 1974). El autor resalta los aportes realizados por estos trabajos para demostrar las bondades de uno u otro modelo, aunque para la época no existían muchos modelos integrados. Sin embargo, ninguno de los trabajos es concluyente ni ofrece un criterio aceptable para la comparación objetiva y multicriterio de los modelos evaluados.

En la última década, numerosas investigaciones sobre el análisis del flujo en la superficie de la ciudad, han sido desarrolladas orientados a la creación de nuevos modelos de simulación, y a la comparación de sus atributos. Como ya se menciona, los modelos más conocidos para drenaje urbano son el MOUSE y el SWMM, ambos permiten trabajar con la planeación ya que están diseñados para proporcionar una perspectiva de los efectos en la cantidad y calidad del agua pluvial en ambientes urbanos, sin embargo el SWMM a diferencia del MOUSE es de dominio público. La primera versión del SWMM fue desarrollado en 1971 por Metcalf and Eddy, de la Universidad de Florida (Resources Engineers for the U.S. Environmental Protection Agency EPA).

Es preciso resaltar que gran parte de los estudios donde se aplican modelos de simulación en ambientes urbanos, no se contempla la etapa de calibración y validación de los resultados. En este sentido, Urbonas (2007), realizó un estudio exhaustivo en el que analizó cuán seguros y precisos son los resultados de los modelos para drenaje urbano, en aspectos como: el efecto de la distribución espacial y temporal de la lluvia, la magnitud de los errores cuando no se tienen datos para calibrar o el origen de las datos es sospechoso, la Incertidumbre inducida por la longitud de registros de lluvias máximas, entre otros aspectos. En el trabajo se concluye que menos del 5% de las simulaciones en ambientes urbanos realizadas en los Estados Unidos son contrastados con datos de campo y que el principal elemento para obtener resultados confiables en el modelado de sistemas de drenaje urbano es la destreza del modelador, en segundo lugar está la selección del modelo apropiado, y por último está el motor matemático del modelo. A pesar que este investigador se limita a los casos de aplicación en Norte América, las limitaciones y las dificultades para calibrar y validar los modelos para drenaje urbano coinciden con las que enfrentan los países en desarrollo en cuanto a la información de campo disponible. Finalmente, se están desarrollando investigaciones orientadas a mejorar las metodologías para la estimación del riesgo asociado a la inundaciones de origen pluvial (localizadas) en ambientes urbanos (flujo en calles), a partir de la construcción de mapas temáticos de peligrosidad y vulnerabilidad física. El autor considera que los aportes realizados por (Kamal et al. 2004) representan un referencia importante.

MATERIALES Y MÉTODOS

El presente trabajo se estructuró con una metodología que comprende cuatro etapas comenzando por la recolección y sistematización de Información de Campo, actualización de la cartografía municipal, levantamiento topográfico e inventario de la infraestructura de drenaje existente (Sánchez 2009). Luego, se utilizó el SIG con dos objetivos fundamentales, el primero fue crear la Infraestructura de datos espaciales y el segundo como base de datos espacial para pre-procesar la información de entrada al Modelo. Finalmente, se implementó el modelo de dominio público EPA-SWMM para el diagnóstico del funcionamiento hidráulico del Sistema Oeste de la Ciudad. Dichas etapas se detallan a continuación:

Recolección de la Información de Campo y Datos Básicos del Sistema de Drenaje Pluvial Urbano

En primer lugar, se delimitó el área de estudio el cual, se divide de manera general en dos zonas: el Sistema Oeste (SO) conformado por la Quebrada de Coro y la Quebrada de Chávez y, el Sistema Este (SE) constituido por el Río Coro y la Laguna de Fundaparques. (Ver figura 1). Dentro de estos grandes Sistemas, existen otros subsistemas de drenaje formados por algunos canales secundarios, obras de captación superficial y colectores enterrados, que en su totalidad conforman el Sistema de Drenaje mayor y menor de la Ciudad. Esta etapa preliminar permitió definir la estructura de base de datos gráfica y no gráfica, así como identificar los atributos que debían recopilarse para cada uno de los sistemas (Sánchez 2009).

Luego, se realizó el trabajo de campo incluyendo el levantamiento de la topografía urbana, y el inventario detallado de la infraestructura de drenaje en la zona de estudio, dicho trabajo permitiría también la validación de los datos existentes. Para ello, se diseñó una planilla que

permite sistematizar los datos estructurales y funcionales y que además, integra una inspección visual con el análisis técnico cualitativo de las estructuras con el fin de obtener resultados fiables y de calidad. Este formulario además, permitió elaborar la memoria fotográfica de la infraestructura del Sistema de drenaje mayor y menor. El trabajo de campo se realizó a través de recorridos por la zona de estudio; estos recorridos se hicieron en diferentes ocasiones y condiciones; es decir, en períodos de lluvia y en períodos de sequía durante varios meses para conocer la evolución de las condiciones físicas de la red y así realizar el análisis multi-temporal de los sistemas.

En esta etapa se busca obtener una base de datos detallada de las características físicas y funcionales de las estructuras del área en estudio (usos del suelo). Cabe destacar que, la clasificación de los Sistemas de drenaje pluvial urbano adoptada en esta investigación, coincide con la clasificación adoptada por la mayoría de los investigadores a nivel internacional. El resultado relevante de esta fase, consistió en el inventario sistematizado y detallado de las estructuras de drenaje mayor y menor tanto del sistema Este como del sistema oeste de la Ciudad de Coro.

Por otra parte, otro de los procedimientos tomados en cuenta para la validación de los datos, partió desde el mapa base de la ciudad en formato digital. Para ello, se descargaron una serie de imágenes de satélite con alta resolución a través del programa de dominio público Google Earth las cuales fueron escaladas, geo-referenciadas y superpuestas con el mapa base de Coro enlazado con los puntos de la red geodésica municipal a fin de corregirlo y actualizarlo, tomando en cuenta que existen muchas zonas que han sido urbanizadas de forma acelerada y no planificada en los últimos años.

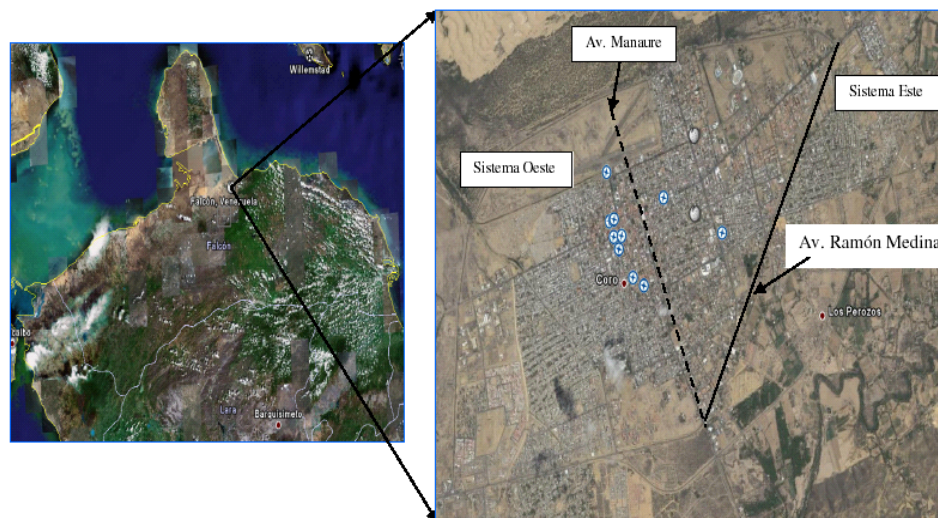


Figura 2.- Localización Geográfica de la Zona de Estudio.



Figura 3.- Imagen de Satélite Georeferenciada y Superpuesta sobre la cartografía digital de Coro.

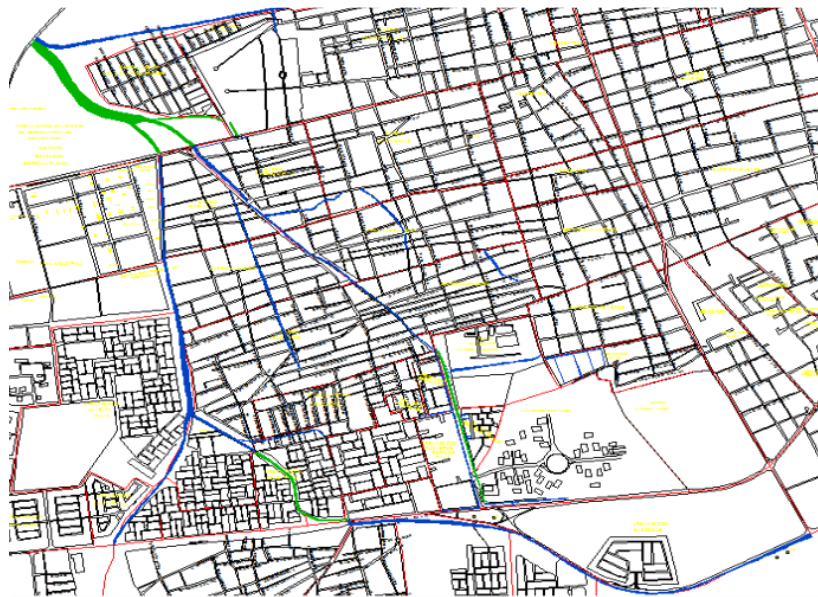


Figura 4.- Mapa Temático del Tipo de Estructura (Sistema de Drenaje Mayor).

Base de Datos Espaciales

En esta fase, se utilizó el SIG como herramienta principal para construir un conjunto de capas con las características de la infraestructura de drenaje pluvial. Para sistematizar y simplificar el proceso de recolección de información la ciudad se dividió en dos sectores, el este y el oeste. El catastro informatizado del sistema de Drenaje, se apoyó en las planillas con la información levantada en campo, en cada planilla se contempló un volumen importante de información, la cual es necesaria para alimentar la base de datos. Entre los datos que incluye están: la ubicación, la geometría de las estructuras, las caracterís-

ticas físicas y funcionales así como un reporte fotográfico multi-temporal, entre otros tópicos.

Una vez creada la base de datos topográfica y de infraestructura de drenaje pluvial, se procedió a la informatización de la base de datos del SIG. Para la informatización, fue necesaria la identificación, caracterización y codificación de las estructuras. En este sentido, la identificación, consistió en localizar todas las estructuras de drenaje existentes en la zona de estudio, determinando así el número y tipo de estructuras de captación de cada sistema. Con la base de datos topográfica y de in-

fraestructura de drenaje cargadas en el SIG, se pasó a la creación de los diferentes mapas temáticos, los cuales contemplan la conjugación de mapas cartográficos, elementos gráficos de la red, información alfanumérica entre otros elementos asimismo, estos permiten al usuario visualizar y cuantificar cualquier tipo de información deseada relacionada con el estudio y la existente dentro de la base de datos. Como por ejemplo: visualizar y cuantificar los tipos de estructura existentes, su forma, estado físico, estado funcional entre otros atributos. La ventaja de estos mapas temáticos es que con ellos, se pueden realizar rápidos análisis de algún objeto o característica de la estructura con el fin de facilitar los planes de mantenimiento así como cuantificar alguna característica en particular de los mismos.

Por último, se construyó una base de datos con las cotas de pavimento de calles debidamente georeferenciadas y enlazadas a la red geodésica municipal de la ciudad. Siendo esto fundamental por una parte, para tener idea de los cambios en las condiciones topográficas de la zona en estudio a fin de proyectar en base a ello estudios futuros, y por otra parte, como insumo principal para la construcción del Modelo Digital de Elevación y la generación semi-automática de los mapas con patrones de flujo en calles así como también los datos de entrada a los modelos de simulación hidrológicos e hidráulicos.

Cabe destacar que, la importancia del MDE en la estimación y construcción de mapa de riesgo asociado a las inundaciones pluviales, es vital, sobre todo con una topografía tan plana como la de Coro. Sin embargo, el MDE en esta investigación se utilizó exclusivamente para obtener un mapa de patrones de flujo lo cual ayuda en gran medida a la delimitación de las sub-cuencas en cualquier cuenca urbana.

Finalmente, se implementó la herramienta SIG en varios casos de aplicación como: control y seguimiento del estado físico estructural de las estructuras de los sistemas de drenaje pluvial, en los cuales se evaluó la geometría de los canales y el análisis multi-temporal de las estructuras, luego se hizo la definición de las cuencas y sub-cuencas vertientes por medio de los patrones de flujo haciendo la comparación entre una metodología manual y una metodología automática usando el software Surfer v8, y como última aplicación se implementó para obtener los datos de entrada para alimentar modelos de simulación.

Uso del SIG como base de datos espacial para modelar SDPU

En el estudio de los Sistemas de Drenajes Urbanos, la relación entre los modelos de aguas pluviales y los SIG pueden tomar muchas formas o bien, ser usados en dos sentidos: a) como un preprocesador de almacenamiento simple de los datos espaciales b) como preprocesador

para estimar parámetros de entrada a los modelos (Martin et al. 2005). Actualmente, la mayoría de los modelos analíticos permiten realizar el análisis hidrológico y el tránsito hidráulico en un solo modulo o interface grafica. El acoplamiento de estos modelos con SIG representa una herramienta efectiva para la gestión de inundaciones urbanas especialmente cuando no se tienen suficientes registros de estaciones hidro-metereológicas y cuando se requieren mapas de zonificación. En este sentido el autor destaca como ejemplo, las extensiones (scripts) desarrolladas por (Kopp 1998) específicamente para el ArcView Gis. El manejo de los parámetros hidrológicos de entrada al modelo, fue posible a partir de la base de datos espacial a través de un archivo compatible con un fichero de entrada al SWMM. Los modelos de datos en los archivos de intercambio fueron diseñados para el Pre procesamiento de la geometría, parámetros de las cuencas y de la distribución espacial de los nodos (bocas de inspección) del sistema menor.



Figura 5.- Esquema de la Metodología para el Pre-procesamiento.

Implementación del Modelo Matemático en el Diagnóstico del Funcionamiento Hidráulico del Sistema Oeste

El sistema de drenaje de la zona este de la ciudad está constituido principalmente por sumideros de ventana para captar el agua y colectores enterrados para conducirla a los sitios de descarga. En este sector de la ciudad, se aplicó el modelo SWMM para analizar y evaluar el funcionamiento del drenaje superficial y subterráneo para diferentes escenarios de lluvia. Con los resultados del SWMM, se construyó la curva de evolución de caudales para toda

la vía, para ello se dividió en tramos respondiendo a la topografía y la direcciones del flujo. Estas gráficas, representan el patrón de comportamiento del agua a lo largo de la vía (caudal vs distancia) y (tirante vs distancia), restringido a un valor máximo de tirante y ancho mojado permisible para establecer su capacidad máxima de conducción. Con la condición de calado admisible, y con los niveles simulados en cada tramo de la vía, se determinaron las zonas de amenaza en las cuales se supera la capacidad de la vía y se pone en peligro la libre circulación de peatones y vehículos.

Aprovechando las potencialidades el SWMM, se procedió a formular una propuesta de solución que comprende la incorporación de nuevas estructuras de captación en los puntos críticos. Para ello, solo se agregaron en el modelo conceptual las posibles obras de captación en los puntos de interés en función de lo observado en las curvas de evolución tanto de flujo como de calados, simulando reiteradamente para observar el comportamiento hidráulico de la vía, una vez incorporada cada estructura, hasta obtener la curva de evolución modificada.

Este tipo de análisis con el SWMM sería trabajoso desde el punto de vista de la recopilación de la información básica, es en este aspecto, en la infraestructura de datos espaciales de la zona y el catastro digitalizado de las áreas tributarias hacia la Avenida, es donde se aprovechan las ventajas que ofrece esta nueva herramienta.

RESULTADOS Y DISCUSIONES

En función del trabajo de campo para la obtención del catastro de la infraestructura de drenaje pluvial urbano de

la Ciudad de Coro, en total, se digitalizaron 193 formularios de campo y 234 memorias fotográficas solo en el Sistema Oeste. Para construir el MDE se levantaron alrededor de 6000 puntos. Este catastro informatizado del sistema de Drenaje puede emplearse para el control y la gestión de activos del municipio. Entre los datos que incluye están: la ubicación, la geometría de las estructuras, las características físicas y un reporte fotográfico. A continuación se muestra el Modelo de Elevación Digital corregido y construido con las cotas de pavimento y representado a través de curvas de contorno, y además se muestran los principales mapas temáticos.

Resultados del Modelo

La zona analizada correspondiente a la Avenida Independencia, cuyo sistema de drenaje es fundamentalmente superficial con algunos puntos de descarga en canales revestidos a largo de la vía.

Con los resultados del SWMM, se construyó la curva de evolución de caudales para toda la vía, para ello se dividió en tramos respondiendo a la topografía y la direcciones del flujo. Estas gráficas, representan el patrón de comportamiento del agua a lo largo de la vía (caudal vs distancia), restringido a un valor máximo de tirante y ancho mojado permisible para establecer su capacidad máxima de conducción. Con la condición de calado admisible, y con los niveles simulados en cada tramo de la vía, se determinaron las zonas específicas en las cuales se supera la capacidad de la vía y se pone en peligro la libre circulación de peatones y vehículos.

En la curva de evolución se observa que el tramo analizado cuya longitud es de 580 m, la capacidad de con-



Figura 6.- Mapa de Contornos MDE.

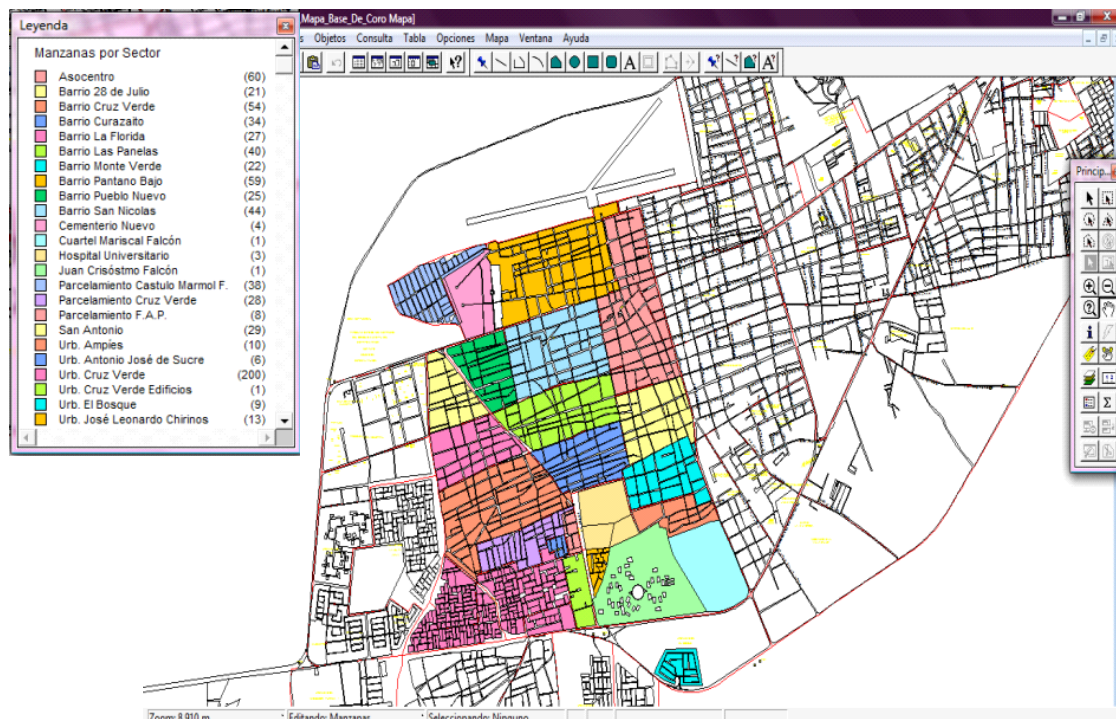


Figura 7.- Mapa Temático con las subcuencas del Sistema Oeste.

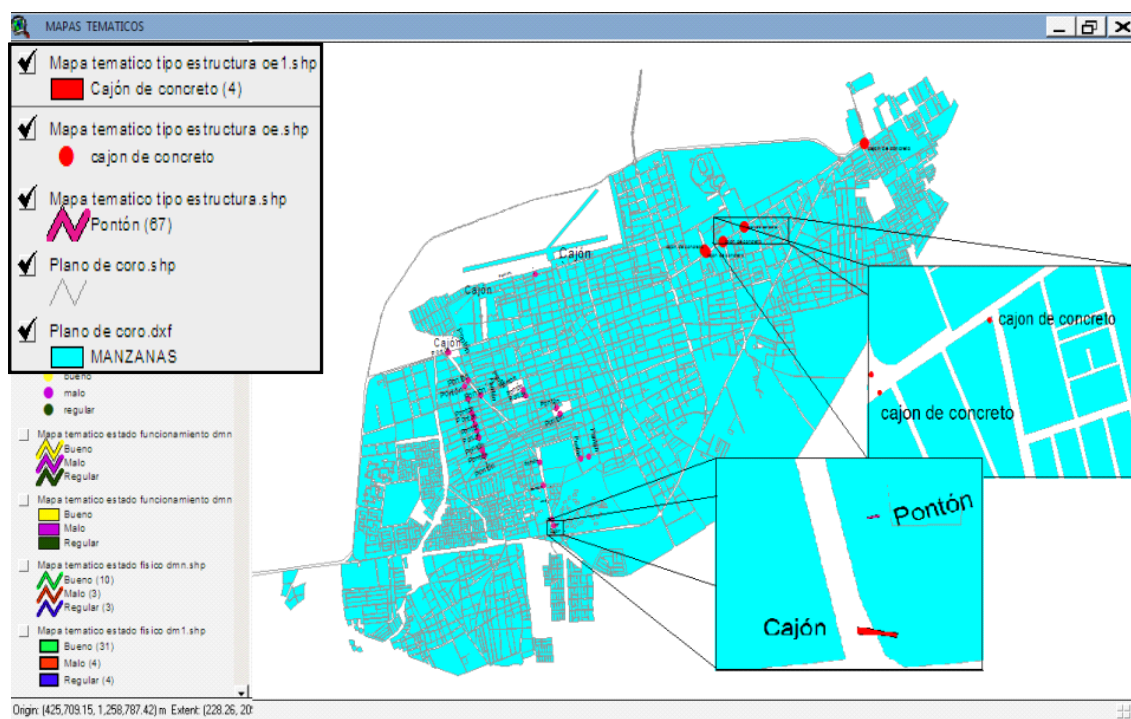
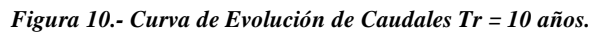
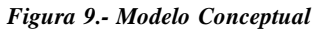


Figura 8.- Consulta a los elementos de una capa



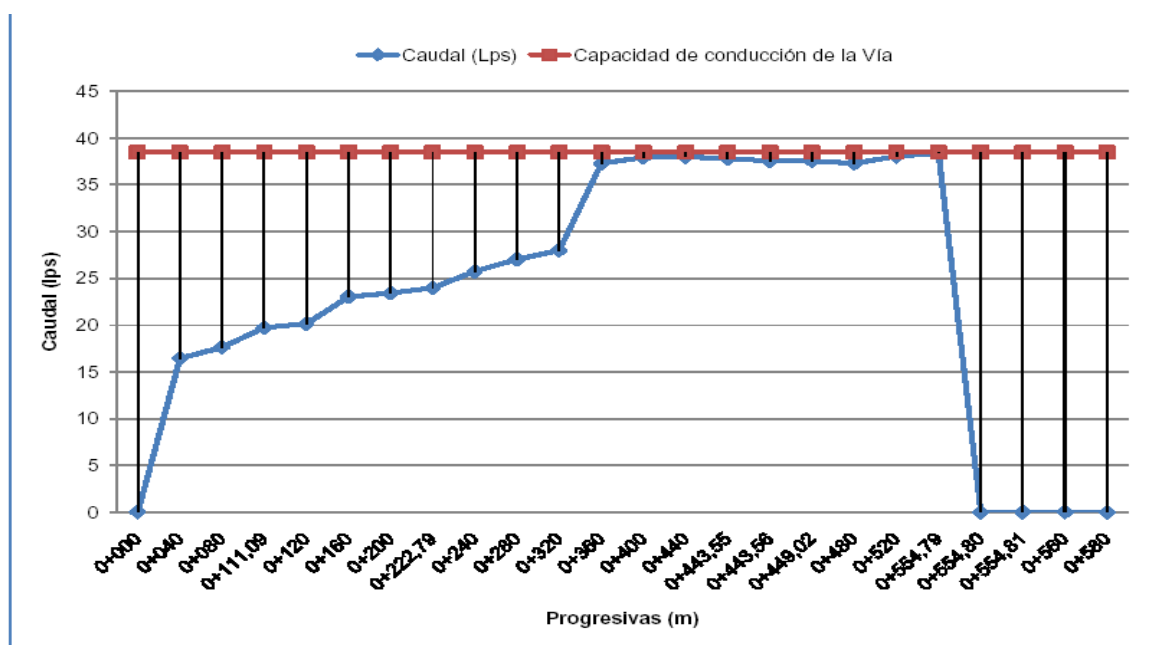


Figura 11.- Curva de evolución modificada $T_r = 10$ años.

ducción de la vía se supera en un 76,50%, lo que equivale a 443,71 m, evidenciando las deficiencias en el sistema superficial existente, así como el déficit en la cantidad de estructuras de captación existentes, que no tienen la capacidad de interceptar la cantidad de escorrentía que se produce durante un evento de lluvia como el simulado. Es obvio, que el comportamiento de la curva de calados vs distancia es similar, es decir, se producen calados que superan los 20 cm de acera en la mayor parte del tramo.

Finalmente, se procedió a formular una propuesta de solución que comprende la incorporación de nuevas estructuras de captación en los puntos críticos. Para ello, solo se agregaron en el modelo conceptual las posibles obras de captación en los puntos de interés en función de lo observado en las curvas de evolución tanto de flujo como de calados, simulando reiteradamente para observar el comportamiento hidráulico de la vía, una vez incorporada cada estructura, hasta obtener la curva de evolución modificada.

Este tipo de análisis con SWMM sería trabajoso desde el punto de vista de la recopilación de la información básica, es en este aspecto, en la infraestructura de datos espaciales de la zona y el catastro digitalizado de las áreas tributarias hacia la Avenida, es donde se aprovechan las ventajas que ofrece esta nueva herramienta.

CONCLUSIONES

La función fundamental del sistema de vinculación desarrollado es mejorar la gestión de la información, siendo la misión de su interface la simplificación y automatización

de las tareas más habituales realizadas por los usuarios. La herramienta constituye una innovación tecnológica a escala nacional, ya que su utilidad va mas allá de la modernización en la gestión de los Sistema de Drenaje del Municipio Miranda, es decir, el sistema está concebido para ser aplicado inicialmente en Coro pero como un proyecto piloto, porque está siendo estructurado en forma general de modo de poder extenderlos a otras regiones.

Al disponer de la infraestructura de datos espaciales se puede tener un control y seguimiento del estado físico y estructural tanto del sistema mayor como el menor. De esta forma, es posible proponer actividades de mantenimiento preventivo y correctivo en cualquiera de los componentes del sistema. Esta fase, comprende la formulación de soluciones y actuaciones concretas sobre el sistema para mejorar su funcionamiento.

La actualización de los datos estructurales e hidrológicos es factor clave para respaldar las futuras decisiones en lo que se refiere a rehabilitaciones del sistema y para la definición del Plan Urbanístico en el Municipio Miranda.

Con la posibilidad de migrar los resultados del modelo matemático al SIG, se facilitan los procesos para cuantificar la amenaza, vulnerabilidad y riesgo de inundación en la zona de estudio, lo cual permitirá llevar a cabo análisis exhaustivos del impacto socio- económico de las inundaciones pluviales en las áreas más críticas.

Otro de los productos importantes, es que con el uso de las aplicaciones del SIG, pueden obtenerse resultados

rápidos y confiables de cualquier componente del sistema con tan sólo hacer uso de la base de datos a través de los mapas temáticos o con las aplicaciones implementadas para este estudio. En este sentido, para el caso de la geometría de los canales, es posible tener un conocimiento preciso de los cambios morfológicos de las estructuras si se cuenta con una base de datos topográfica y a su vez, se mantiene un registro futuro de ellas.

Este estudio demuestra que los SIG para abordar problemas de inundaciones en ambientes urbanos, representan una herramienta valiosa para diseñar un Plan director de Drenaje como instrumento que brinda respaldo técnico a la implementación de ordenanzas locales.

El pre-procesamiento y gestión de datos espaciales del modelo de simulación de pre- y post-procesamiento y gestión de datos y comunicación, mediante el uso de funciones básicas y de fácil manipulación disponibles en línea.

Es claro que existen muchos paquetes informáticos en el mercado que cuentan con las características matemáticas y de programación necesarios para modelar adecuadamente la dinámica de cuerpos de agua naturales. Sin embargo, el espectro de búsqueda debe ser adecuado para cumplir con los objetivos del proyecto. Es preciso, resaltar que los softwares más costosos del mercado no necesariamente generan resultados más confiables, es conveniente seleccionar el que se pueda ajustar de mejor manera a las características particulares de un problema específico. Es de vital importancia, que en el proceso de modelación y la herramienta informática seleccionada sea familiar para él y se ajuste a la cantidad y calidad de la información técnica existente y disponible.

Como análisis comparativo entre el enfoque tradicional y la vinculación SIG-Modelo Integrado puede decirse que la aplicación SIG desarrollada permite tener una base de datos espacial con toda la información del Sistema de Drenaje Pluvial Urbano de una forma estructurada y coherente, a diferencia del enfoque tradicional adoptado por el municipio en el que predomina el desconocimiento absoluto del estado físico de la infraestructura y la dispersión de la información. Un problema recurrente en los proyectos de drenaje es la incertidumbre inducida por el desconocimiento total de las rasantes de pavimentos en la ciudad y por ende de la dirección del flujo en calles, no obstante, la base de datos topográfica obtenida con las cotas de pavimento es actualizable, por lo es posible conocer los patrones de flujo en calles ante cualquier modificación en dichas cotas a partir del MDE.

La vinculación entre el SIG y el Modelo de simulación integrado representa un herramienta confiable para diseñar un plan director de drenaje pluvial en la ciudad, ya que

entre otras potencialidades permitiría el modelaje del sistema en conjunto con flujo impermanente, y no como se realiza actualmente, empleando el Método Racional para el análisis hidrológico y la ecuación de Manning para el tránsito en conductos.

REFERENCIAS

- Achleitner, S.** (2006). "Modular conceptual modelling in urban drainage development and application of city drain", Tesis Doctoral, Universidad de Innsbruck, Austria.
- Barber, J.L., Lage, K.L., y Carolan, P.T.** (1994). "Stormwater Management and Modelling Integrating SWMM and GIS", Urban and Regional Information Association, pp 310-314, Kansas City, Missouri.
- García, J.I., De Paiva, E.M., Brites, A.P. y De Paiva, R.C.** (2004). "Evaluación de la discretización en una cuenca urbana a través del modelo SWMM". XXI Congreso Latinoamericano de Hidráulica, Sao Paulo, Brasil, IARH.
- Gómez, M.** (2009). "Comportamiento hidráulico de las calles durante lluvias extremas en zonas urbanas". Ingeniería Hidráulica en México, Vol 14, No. 3, pp. 51-62, México.
- Kamal, H. y Bennis, S.** (2004). "Stormwater Drainage Model Couple with Flood Depth Mapping: a new approach towards solution of Urban Drainage Problems", River Hydraulics Division, Surface Water Modelling Centre, Dhaka, Bangladesh.
- Kopp, S.** (1998). "Developing a Hydrology Extension for ArcView Spatial Analyst". ESRI Arc User Magazine, ESRI, Redlands, California.
Disponible en <http://www.esri.com/news/arcuser/arcuser498/hydrology.html>.
- Maksimovic, C.** (2001). "General overview of urban drainage principles and practice". In: Urban drainage in specific climates. Vol 1: Urban drainage in humid tropics", Ed. UNESCO, Paris, Francia.
- Marsalek, J., Dick, T.M. y Wisne, P.E.** (1975). "Comparative Evaluation of Three Urban Runoff Models", Water Resources Bulletin, American Water Resource Association (AWRA), Vol 11, No. 2, pp. 306-328. Colorado.
- Martin, P.H., Eugene, J.L., James, P.D., Edsel, D. y Mark, A.** (2005). "Interfacing GIS with water resource Models: a state - of - the - art review", Journal of the American Water Resource Association (AWRA) , Vol. 41, No. 6, pp. 1471-1487. Colorado.
- McKinney, D., Maidment, D. y Tanriverdi, M.** (1992). "Expert Geographic Information Systems for Texas Water Planning", Journal of Water Resources Planning and Management, ASCE, Vol 119, No. 2, pp. 170-193.
- Papadakis, C. y Pruel, H.C.** (1973). "Testing of Methods for Determination of Urban Runoff", Journal of the Hydraulics Division, ASCE, Vol 99, No. H19, pp. 1319-1335, Reston, Virginia.

- Pedraza, R.A., Gomez Valentín, M. y Reyna, S.** (2006). "Efectos de Escala sobre la Simulación del Flujo de Agua Superficial en Áreas Urbanas Usando Modelos Basados en la Onda Cinemática", Ingeniería del Agua, Vol. 13, No. 2, pp. 149-175, España.
- Riccardi, G.** (2000). "Modelación de escurrimiento en cuenca urbana con interacción entre sistemas, mayor y menor", Centro Universitario Rosario de Investigaciones Hidroambientales- FCEIA- CIUNR-UNR, Rosario, Argentina.
- Sánchez, L.** (2008). "Uso de un Modelo Hidrológico-Hidráulico para Evaluar un Sistema de Drenaje Urbano en Zonas Predominantemente Planas". XXIII Congreso Latinoamericano de Hidráulica, Cartagena de Indias, Colombia.
- Sánchez, L.** (2009). "Una nueva herramienta para el análisis de los sistemas de drenaje pluvial urbano. Caso de aplicación: Coro, Estado Falcón, Venezuela". IX Congreso Internacional de Hidráulica. Villa Clara, Republica de Cuba.
- Urbonas, B.** (2007). "Stormwater Runoff Modeling; Is it as Accurate as We Think?", International Conference on Urban Runoff Modeling: Intelligent Modeling to Improve Stormwater Management, Humbolt State University, Arcata, California.
- Zaghloul, N.A.** (1983). Sensitivity analysis of the SWMM Runoff-Transport parameters and the effects of catchment discretisation" Advances in Water Resources, Vol 6, No. 4, pp. 214-223.

Recibido: junio del 2011
Aprobado: julio del 2011