

## **SWMM-UC, UNA INTERFAZ COMPUTACIONAL PARA LA MODELACIÓN DE SISTEMAS DE DRENAJE URBANO**

JORGE GIRONÁS L. y BONIFACIO FERNÁNDEZ L.  
Depto. Ingeniería Hidráulica y Ambiental, P. Universidad Católica de Chile.  
Av. Vicuña Mackena 4860. Casilla 306, Correo 22, Santiago, Chile.  
Teléfono:3544227; Fax: 3545876  
e-mail: [jgironas@ing.puc.cl](mailto:jgironas@ing.puc.cl) y [bfernand@ing.puc.cl](mailto:bfernand@ing.puc.cl)

### **RESUMEN**

La modelación de los procesos hidrológicos es un elemento fundamental para un adecuado análisis y planificación del comportamiento hidrológico de las nuevas urbanizaciones y sus sistemas de drenaje.

Este trabajo presenta el software SWMM-UC 1.0, una interfaz en español para el modelo EPA-SWMM. Su objetivo principal es facilitar el uso de un modelo hidrológico consolidado, centrando su aplicación principalmente en el diseño y análisis de redes de drenaje secundario. La interfaz fue diseñada en Visual Basic como una aplicación Excel y permite modelar los más importantes procesos hidrológicos, como son la transformación de la lluvia en escorrentía y la propagación de ésta en áreas abiertas, conductos libres y elementos de almacenamiento. El software incorpora una serie de modificaciones del modelo original que simplifican su uso y se agregan además parámetros e información propia del contexto nacional. Estos cambios buscan masificar el empleo del SWMM en aplicaciones tradicionales que actualmente utilizan metodologías más simples o de menor precisión.

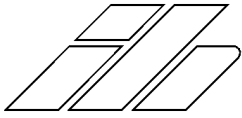
SWMM-UC es un paso inicial en el desarrollo de una herramienta de modelación más completa que a futuro permita simular los más complejos procesos que pueden ocurrir en el sistema de drenaje urbano.

### **ABSTRACT**

The urban development must be concerned about the analysis and planning of new urban areas, their hydrological behaviors and their drainage systems. One of the key factors in this task is the modeling.

This paper presents the software SWMM-UC, version 1.0, an interface in Spanish for the EPA-SWMM model. Its main objective is to make easier the use of a well-known model, focusing its usage in storm drainage systems design. The interface was developed in Visual Basic as an Excel application and it allows to model the most important hydrological processes such as rainfall-runoff transformation and the routing through open areas, not surcharged conduits and storage facilities.

The software has some modification from the original model focused into simplifying its use. Beside, it contains parameters and information, which consider the national context. All these changes have as main goal to spread the SWMM in traditional applications that currently use methodologies too simple and inaccurate. SWMM-UC is an initial step in a long-term process that will allow creating a modeling tool able to simulate most complex hydrological phenomena.



## **SWMM-UC, UNA INTERFAZ COMPUTACIONAL PARA LA MODELACIÓN DE SISTEMAS DE DRENAJE URBANO**

### **1 Introducción**

El tema de las aguas lluvias ha tomado una fuerte importancia en el último tiempo. Las autoridades y entidades interesadas han desarrollado estudios y trabajos que muestran una enorme falencia en el diseño de los sistemas de drenaje urbanos. La solución de los problemas ya creados después de años de poca inversión, se presenta como una tarea extensa y de elevados costos; los desafíos también son importantes si se busca evitar similares fallas en el desarrollo de futuras urbanizaciones. Para tal efecto deben generarse nuevas herramientas que permitan perfeccionar el análisis, diseño, construcción y operación de los sistemas de drenaje secundarios urbanos, siendo la masificación del uso de modelos hidrológicos uno de los principales aspectos a desarrollar. Este trabajo presenta SWMM-UC, una interfaz para el modelo SWMM capaz de enfrentar este desafío.

### **2 Antecedentes Generales**

Durante varias décadas en Chile el diseño de los sistemas secundarios de drenaje ha sido una actividad de baja importancia en el desarrollo urbano, quedando relegada a un aspecto menor de los proyectos de pavimentación. El problema no es pequeño considerando el constante crecimiento de las ciudades, existiendo comunas cuya población se ha duplicado, e incluso triplicado en los últimos 10 años. La información proporcionada por el INE permite estimar que el crecimiento urbano anual en Chile es equivalente a una ciudad de 500.000 habitantes, y en su mayoría, estos nuevos sectores no consideran las nuevas tecnologías existentes para el control de las aguas lluvias.

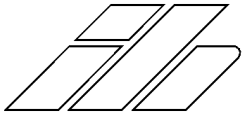
El aspecto de la modelación tampoco ha tenido una mayor relevancia en este sentido, careciendo el medio local de modelos que representen adecuadamente el comportamiento hidrológico de las cuencas urbanas y permitan diseñar apropiadamente sus sistemas de drenaje.

Ya sea por un tema de complejidad, costos o incompatibilidad con el medio local, los buenos modelos hidrológicos urbanos han sido utilizados sólo en grandes estudios y planes maestros, pero no en el análisis y diseño de las redes secundarias, campo hacia el cual está dirigido el presente trabajo.

### **3 El modelo, SWMM y sus interfaces comerciales**

#### **3.1 El modelo**

Huber y Dickinson (1992) y Zaho (2001), definen al modelo SWMM (Storm Water Management Model) de la U.S. EPA (United States Environmental Protection Agency) como “un modelo matemático completo para la simulación de la calidad y cantidad de escorrentía urbana, tanto en los sistemas de drenaje unitarios, separados y cursos naturales”. En él se modelan todos los aspectos de la hidrología urbana y sus ciclos, incluyendo la escorrentía superficial y subsuperficial, el transporte a través de la red de



colectores, el almacenamiento y el tratamiento. Su desarrollo se remonta a inicios de la década de los 70, y ha sido perfeccionado y complementado en las sucesivas actualizaciones. SWMM está escrito en FORTRAN y es un software de dominio público, lo que ha generado una constante actividad en torno a él, tanto en el campo de la investigación como en la aplicación, que han hecho de este modelo uno de los más usados en el campo de la hidrología urbana.

SWMM es un modelo de base física que simula los aspectos de la cantidad (hidrogramas y volúmenes escurridos) y la calidad (polutogramas y concentraciones) de las escorrentías urbanas. Las entradas del modelo son las precipitaciones, otras variables meteorológicas (evaporaciones, temperaturas, etc.) y la caracterización de los elementos que conforman el sistema, entre los que se incluyen las subcuencas, el sistema de transporte, los elementos de almacenamiento y las unidades de tratamiento. Es posible simular un evento único como también de un largo período de tiempo, utilizándose registros continuos para las variables de entrada, obteniéndose a la vez series continuas para los resultados. El modelo puede ser usado para el análisis, planificación, diseño y operación de sistemas de drenaje urbano.

SWMM está estructurado en bloques o módulos los cuales pueden operar en forma independiente o conectados entre sí. Estos bloques se clasifican en computacionales y de servicio, y son ilustrados en la figura 1.

Los bloques computacionales son los que realizan los cálculos asociados a los procesos hidrológicos e hidráulicos. Estos son: RUNOFF, TRANSPORT, EXTRAN y STORAGE/TREATMENT. Por otra parte, los bloques de servicio apoyan el desempeño de los módulos computacionales y los interconectan, facilitando tanto el ingreso de datos como el manejo de la información y de los resultados obtenidos. Estos bloques son: EXECUTIVE, STATISTICS, GRAPH, COMBINE, RAIN y TEMPERATURE.

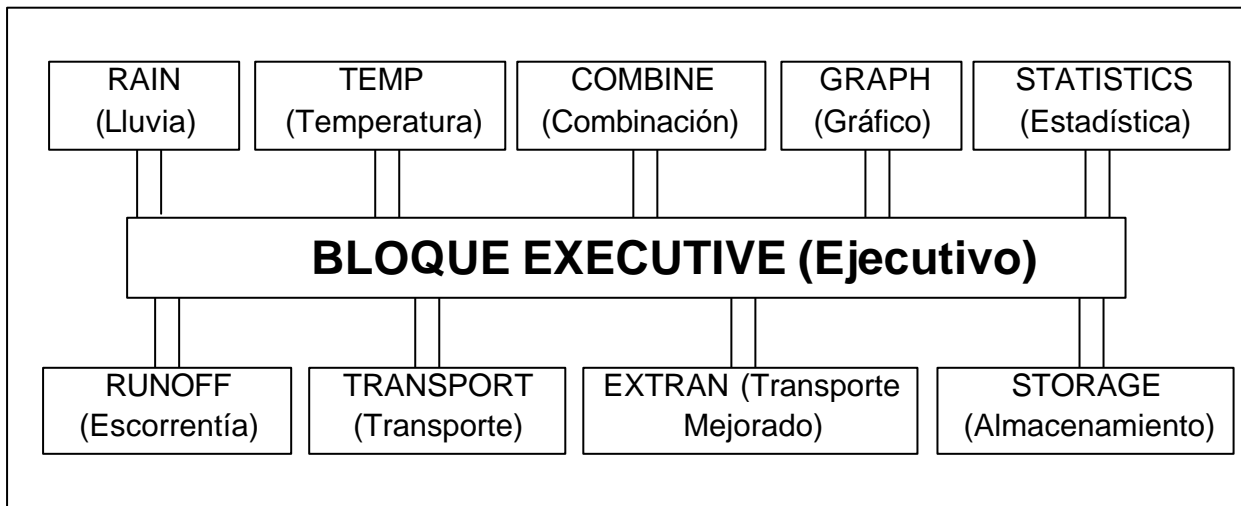
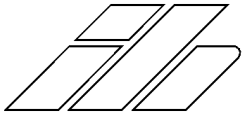


Figura 1: Bloques del SWMM y su interacción.

Una descripción breve de los bloques computacionales está dada por:



- **Bloque RUNOFF (Escorrentía):** Este es el bloque hidrológico básico y crítico del SWMM. A partir de la información meteorológica y la caracterización de la cuenca simula el proceso lluvia-escorrentía, tanto en los aspectos de la cantidad como la calidad, propagando esta información a través de los conductos secundarios hacia los sectores primarios de la red de drenaje. La salida de este bloque corresponde a los hidrogramas y polutogramas.
- **Bloque TRANSPORT (Transporte):** Módulo para la propagación de los caudales y contaminantes a través de la red de drenaje. Éste necesita como entrada la configuración de la red de conductos y los hidrogramas a propagar. Se utiliza el método de la onda cinemática modificada y se considera independencia de las condiciones de aguas abajo.
- **Bloque EXTRAN (Transporte Mejorado):** Este es el otro bloque hidráulico disponible para la propagación de caudales a lo largo del sistema de drenaje. Requiere como entrada la configuración de la red de conductos y los hidrogramas a propagar. EXTRAN resuelve las ecuaciones completas de St. Venant, pudiéndose simular los más variados fenómenos hidráulicos, importantes de considerar en redes de drenaje extensas y complejas. Sin embargo no simula la propagación de contaminantes.
- **Bloque STORAGE/TREATMENT:** Este bloque es utilizado para la propagación de caudales y contaminantes a través de elementos de almacenamiento y tratamiento, con la posibilidad de modelar hasta cinco unidades de retención o detención.

Debido a la estructura de bloques del modelo y a las variadas posibilidades en cada uno de éstos, es importante que el usuario seleccione adecuadamente las herramientas a usar teniendo en cuenta la información existente, las magnitudes involucradas, los procesos hidrológicos relevantes y el nivel de precisión requerido, de manera de desarrollar el modelo más simple posible para representar el sistema en estudio.

Las aplicaciones del SWMM o de alguno de sus módulos son numerosas y muy variadas, considerándose un amplio rango tamaños de las cuencas y diversas características de éstas. En Chile el modelo ha sido aplicado principalmente en grandes estudios, concretamente en Planes Maestros, incluido el de la ciudad de Santiago (CADE-IDEPE-DOH-MOP, 2001).

### 3.2 Las interfaces comerciales

El manejo del modelo se facilita enormemente con las interfaces computacionales o "Shells". Éstas son software que permiten un ingreso más cómodo de la información y un procesamiento más acabado de los resultados, incluyendo una visualización gráfica de éstos. Algunas de estas herramientas utilizan el código oficial del modelo, mientras que otras usan códigos modificados, agregando rutinas que permiten representar situaciones no contempladas originalmente. Algunos de estas interfaces son presentados en la tabla 1.

Las interfaces comerciales del SWMM son imprescindibles para su uso masivo aplicado al diseño de redes secundarias, dado que facilitan enormemente la entrada y procesamiento de datos. Sin embargo, algunas de las características de las disponibles



en el mercado internacional no las hacen totalmente compatibles con la realidad nacional, lo que ha impedido su masificación y, por ende, el uso correcto de un modelo poderoso a todo nivel dentro de las variadas posibilidades de aplicación.

Tabla 1: Principales interfaces comerciales para el modelo SWMM

Software	Compañía	País	Precio aproximado (US\$ por licencia)
PCSWMM	Computational Hydraulics Int. (CHI)	USA/Canadá	450
MIKE-SWMM	DHI Water & Environment y Camp Dresser & McKee Inc. (CDM).	USA	4000
XP-SWMM	XP Software Inc.	USA	Desde 545
MTVE	-	USA	1000
Visual CAICE SWMM <sup>1</sup>	CAICE Software Corporation	USA	4000-5000

#### 4. La interfaz, SWMM-UC, versión 1.0

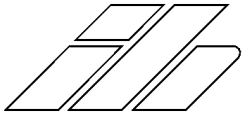
##### 4.1 Antecedentes

Analizadas las características del SWMM y sus interfaces comerciales, surge la idea de desarrollar una herramienta computacional que permita masificar el modelo, especialmente en el campo del diseño y análisis de sistemas de drenaje secundarios. Dicha herramienta es SWMM-UC, versión 1.0, una interfaz para el modelo SWMM acondicionada a la realidad nacional.

El software busca superar las desventajas propias del SWMM y sus interfaces en el contexto de uso local. Las siguientes son las principales características SWMM-UC.

- **Lenguaje:** SWMM-UC es una plataforma desarrollada en español, siendo la única herramienta de este tipo disponible en este idioma.
- **Simplificaciones:** La primera versión de SWMM-UC fue concebida acorde a las necesidades actuales de aplicación más típicas en el país. Por tal motivo, se han dejado fuera de esta versión una serie de módulos y herramientas que, a medida que la problemática de las aguas lluvias adquiriera nuevos matices y requiera de estas técnicas de simulación, será necesario

<sup>1</sup> Utilizado en el plan maestro para la ciudad de Santiago (CADE-IDEPE-DOH-MOP, 2001) y de otras ciudades.



considerar. En su versión 1.0, SWMM-UC permite el uso de los módulos computacionales RUNOFF y STORAGE.

- **Ambiente de trabajo:** SWMM-UC es un software a ser ejecutado en Microsoft Excel y su programación está realizada en gran parte en Macros para Visual Basic for Application (VBA). Se eligió este formato por la familiaridad que tienen las consultoras, ingenieros y usuarios en general con el manejo de planillas de cálculo, destacando además el soporte gráfico disponible que facilita la presentación de resultados. El uso de este tipo de herramientas confeccionadas con hojas de cálculo es una práctica común entre las consultoras norteamericanas que utilizan el SWMM (Roesner, L., comunicación personal).
- **Costos:** Las simplificaciones realizadas han permitido generar una herramienta de menor costo que las disponibles actualmente. De hecho, esta versión será de dominio público.
- **Parámetros nacionales:** Si incorporan distintas lluvias de diseño y distribuciones temporales de éstas para facilitar el uso del modelo. Se dispone además de información para algunas de las variables de ingreso y se proponen valores para los parámetros de infiltración.
- **Mercado objetivo y usuarios tipos:** Lo que se busca con la herramienta es que el modelo SWMM no sea utilizado sólo en grandes estudios, planes maestros y actividades de investigación, si no que también sea usado por las urbanizadoras que desarrollan pequeños asentamientos urbanos y en la evaluación de proyectos donde, en general, el problema de las aguas lluvias ha merecido menor interés.

## 4.2 Estructura y funcionamiento

SWMM-UC está conformado por tres módulos junto con el ejecutable del SWMM y algunos archivos temporales creados en la corrida del modelo. Los módulos son:

- **RUNOFF-UC:** Módulo desarrollado como un libro Excel que sirve de interfaz para el bloque RUNOFF. Su función es la transformación de lluvia en escorrentía y la propagación de éstas a través de áreas abiertas y conductos.
- **STORAGE-UC:** Módulo desarrollado como un libro Excel que sirve de interfaz para el bloque STORAGE. Su función es la propagación de las escorrentías a través de una obra de almacenamiento que tenga una salida caracterizada ya sea por una ecuación de descarga o por una curva de descarga propiamente tal. Junto a esta evacuación se simula la eliminación de agua residual que pudiese quedar al interior del estanque.
- **GRAPH-UC:** Módulo desarrollado en VISUAL BASIC para presentar y procesar gráficamente los resultados obtenidos.

Estos módulos se ejecutan independientemente, lo que permite al usuario poder utilizarlos por separado. En caso de querer ejecutarse STORAGE-UC empleando caudales generados por el módulo RUNOFF-UC, no hay ningún problema, siendo la conexión entre los módulos muy simple.



No sólo se ha simplificado la cantidad de módulos del modelo, si no que también los procesos al interior de cada uno de éstos, de manera tal de facilitar su uso en situaciones típicas. La tabla 2 presenta los procesos hidrológicos e hidráulicos considerados, el módulo de SWMM-UC usado y la técnica o metodología asociada.

En el caso del módulo RUNOFF-UC, los procesos que se han dejado afuera en esta versión original, considerando que el objetivo es contar con una herramienta de diseño de las redes secundarias, son:

- Generación, propagación y tratamiento de contaminantes y sólidos suspendidos.
- Precipitación y derretimiento nival.
- Método de Green-Ampt para la infiltración.
- Flujo de agua subterránea.

De esta manera, para simular el proceso lluvia-escorrentía básicamente la información que requiere SWMM-UC corresponde a la caracterización de los conductos, cuencas y la disposición de estos elementos en la red. Esta caracterización está dada por parámetros de infiltración, área, retención inicial y anchos efectivos de las subcuencas aportantes, porcentaje de impermeabilidad, los coeficientes de Manning correspondientes a cada área y a los conductos y la geometría de estos últimos.

En el caso del módulo STORAGE-UC, se ha dejado fuera los procesos relacionados con la propagación y tratamiento de contaminantes y la herramienta de cálculo de costos.

Tabla 2: Procesos hidrológicos e hidráulicos considerados.

Procesos	Módulo	Metodología
Precipitación	RUNOFF-UC	1. Lluvias de diseño disponible. 2. Ingreso libre por el usuario.
Infiltración	RUNOFF-UC	Ecuación de Horton modificada
Generación de la escorrentía y propagación por áreas abiertas	RUNOFF-UC	Método del embalse no lineal sobre tres áreas: permeable e impermeable con almacenamiento e impermeable sin almacenamiento
Propagación por conductos	RUNOFF-UC	Acople de ecuaciones de Manning y continuidad
Propagación por obras de almacenamiento	STORAGE-UC	Ecuación de continuidad



En esta primera versión de SWMM-UC no se incluyen los módulos EXTRAN y TRANSPORT, herramientas para la propagación de los caudales. Ambos bloques permiten modelar situaciones complejas que no debiesen darse en las redes secundarias de drenaje. Es más, el diseño de éstas debe apuntar a que el escurrimiento sea en condiciones libres y sin presencia de fenómenos hidráulicos complejos. Utilizando RUNOFF-UC para el análisis de escurrimientos en conductos, se puede estudiar perfectamente una red con flujo gravitacional, donde no hay escurrimiento en presión y donde la salida de los conductos puede ser libre o a través de un orificio o vertedero. De hecho, Huber y Dickinson (1992) señalan que para una red de colectores pequeña –diámetros de los tubos menores a 75 cm.- el bloque RUNOFF es suficiente para representar bien la propagación de caudales.

#### 4.3 Presentación de resultados

Dos son los resultados importantes presentados por RUNOFF-UC.

- a. Hidrogramas en los conductos deseados y en los nodos finales de la red.
- b. Tabla resumen con el comportamiento hidráulico de los elementos de la red. Se incluye los caudales y alturas máximas alcanzados, y una comparación de estos valores con las capacidades máximas permitidas según las características de los conductos. Se especifica además si se sobrepasa la capacidad máxima y por cuanto tiempo.

Por otra parte, STORAGE-UC entrega como resultados el hidrograma de salida desde el elemento de retención y el comportamiento de la altura de la superficie libre durante el periodo de operación de la obra.

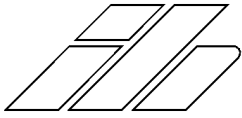
Los resultados generados por ambos módulos pueden ser visualizados y procesados con GRAPH-UC. Algunas de las tareas que puede realizar esta herramienta son la graficación de todas las series en forma simple o combinada, la comparación de éstas con series ingresadas por el usuario, el cálculo de los volúmenes escurridos, la fijación de umbrales de manera de estudiar el comportamiento de las series según este límite, la impresión de los gráficos generados y la posibilidad de copiarlos para poder utilizarlos en otras aplicaciones.

### 5 Caso real estudiado

A continuación se presenta un pequeño ejemplo para validar la aplicación del modelo, utilizando las simplificaciones consideradas por SWMM-UC, en el análisis y diseño de pequeñas áreas urbanas. En este caso se utilizaron resultados obtenidos de la campaña de registros en una cuenca piloto implementada en la comuna de Puente Alto, Santiago. Esta zona residencial tiene un área total de 2075 m<sup>2</sup>, considerándose veredas, calles, un área verde y 9 sitios residenciales de aproximadamente 170 m<sup>2</sup> cada uno. Los ensayos de infiltración indican una permeabilidad en condiciones saturadas cercanas a los 30 mm/hr.

En la construcción del modelo cada uno de los 9 sitios con su respectiva área de calle y vereda representa una subcuenca, considerándose adicionalmente una décima





área aportante en el extremo aguas abajo de la superficie en estudio, la cual representa una pequeña área verde. La pendiente y ancho efectivo de cada área aportante corresponde directamente a la pendiente y el ancho de cada sitio, mientras que la impermeabilidad efectiva se obtuvo a partir de observaciones en terreno, con un rango entre 50% y 90% para este valor según el sitio residencial y un valor nulo en el área verde. Las cunetas se modelaron como canales de sección triangular con un coeficiente de rugosidad de 0.014.

La cuenca y su respectiva representación se presentan en la figura 2, mientras que los resultados de la modelación se muestran en la figura 3.

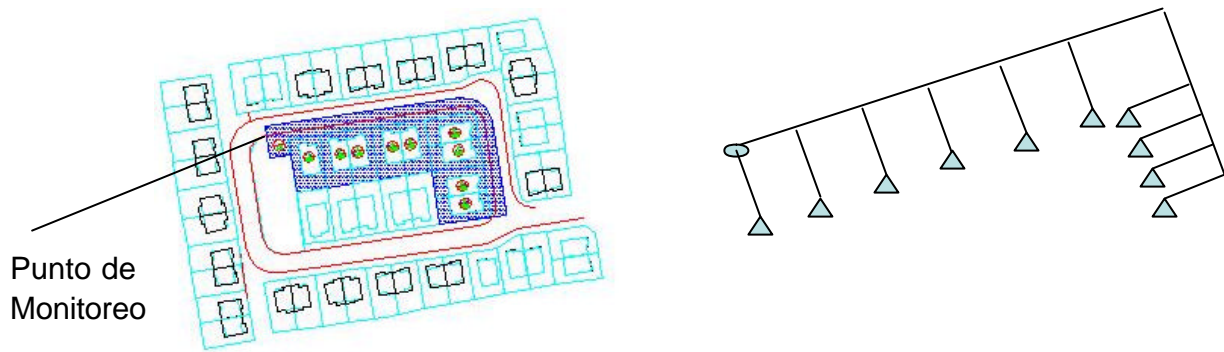


Figura 2: Cuenca piloto.

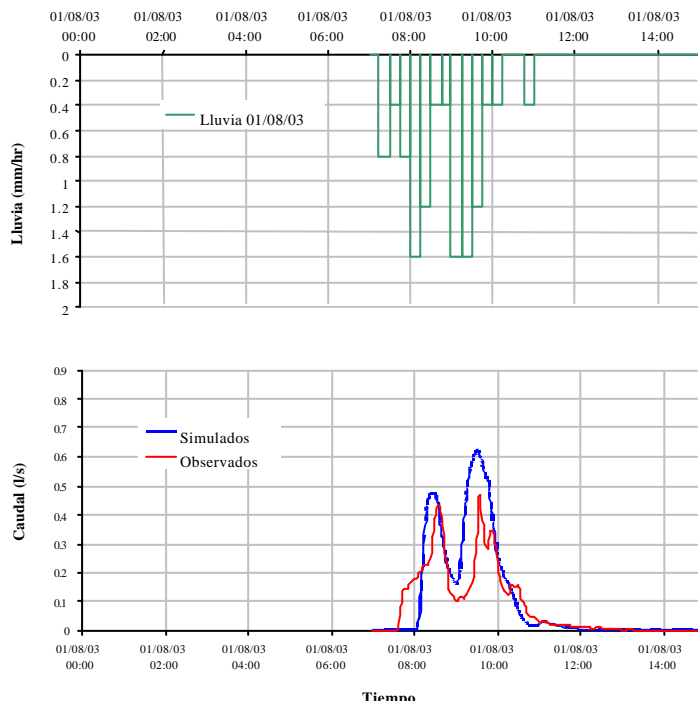


Figura 3: Resultados de la simulación en la cuenca piloto.



Los resultados de este pequeño ejemplo muestran un ajuste bastante bueno entre el hidrograma observado y el simulado utilizando la herramienta presentada.

Esta modelación permitió observar la importancia, o irrelevancia según sea el caso, de los distintos parámetros del modelo, la cual depende fuertemente del tamaño de la cuenca y la magnitud de la tormenta. Concretamente en este caso donde el área en estudio es tan pequeña, los tiempos para los caudales máximos son relativamente fáciles de predecir ya que básicamente corresponden a los tiempos en que ocurren las intensidades máximas. Por otra parte, el almacenamiento inicial es uno de los parámetros relevantes en el caso estudiado, siendo la variable clave utilizada en la calibración, algo que seguramente no tendría la misma importancia en caso de modelarse un área más extensa o precipitaciones mayores. Para la cuenca analizada, se utilizaron valores de este parámetro de 0.4 mm y 1 mm para las áreas impermeables y permeables respectivamente.

## 6 Conclusiones y Comentarios

El trabajo desarrollado presenta SWMM-UC, una propuesta de interfaz en español para el modelo SWMM, acondicionada a la realidad nacional y orientada principalmente al análisis y diseño de redes secundarias de drenaje urbano, áreas en que se pretende mejorar sustancialmente los estándares en la modelación. Los principales procesos hidrológicos modelados son la generación de escorrentía y la propagación de éstas a través de espacios abiertos, conductos libres y elementos de retención.

Como actividades futuras se plantea la necesidad de utilizar masivamente la interfaz y equiparla con herramientas adicionales para la modelación de procesos más complejos.

## 7 Referencias

1. CADE-IDEPE-DOH-MOP Plan Maestro de Evacuación y Drenaje de Aguas Lluvias del Gran Santiago, R.M. Ministerio de Obras Públicas, Santiago, Chile, 2001.
2. HUBER, W. W. and DICKINSON, R. Storm Water Management Model, Version 4: User's Manual. U.S. Environmental Protection Agency, Athens, Georgia, USA, 1992.
3. JAMES, W., HUBER, W.C., DICKINSON, R.E. Y JAMES, R.C. Water Systems Models Hydrology. User guide to SWMM4 RUNOFF and supporting modules (RAIN, TEMPERATURE, COMBINE, and STATISTICS). Computational Hydraulics International, Guelph, Ontario, Canadá, 2002.
4. JAMES, W. Y JAMES, R.C. Water Systems Models Hydraulics. User guide to SWMM4 TRANSPORT, EXTRAN and STORAGE modules. Computational Hydraulics International, Guelph, Ontario, Canadá, 2002.
5. ZHAO B. Computer Models for Stormwater System Design. Collection Systems Design Handbook. Mays, L. (Editor), McGraw-Hill, Inc., New York, USA, 2001.