

UNIVERSIDAD NACIONAL DE ROSARIO

ESCUELA DE POSGRADO Y EDUCACIÓN CONTINUA
FACULTAD DE CIENCIAS EXACTAS, INGENIERIA Y AGRIMENSURA



Tesis de Maestría

“MODELACIÓN HIDROLÓGICA-HIDRÁULICA TOTALMENTE DISTRIBUIDA DE UNA CUENCA FUERTEMENTE ANTROPIZADA – CASO DEL RÍO CASCAVEL (GUARAPUAVA/PR, BRASIL)”

por

Stehli, Pablo Tomás

Director: Mg. Weber, Juan. F. (Universidad Tecnológica Nacional, Facultad Regional Córdoba).

Codirector: Dr. Vestena, Leandro R. (Universidad Estatal de Centro-Oeste, Paraná, Brasil).

Tesis presentada en cumplimiento parcial de los requisitos para optar por el título de:
Magíster en Recursos Hídricos en Zona de Llanura.

2018



MODELACIÓN MATEMÁTICA DISTRIBUIDA DEL IMPACTO
HIDROLÓGICO-AMBIENTAL DE LOS INCENDIOS EN LA ZONA
SERRANA DE LA PROVINCIA DE CÓRDOBA

Resumen

En este trabajo se presenta la modelación hidrológica distribuida de una cuenca fuertemente urbanizada. Para lo mismo se seleccionó el modelo TREX para la modelación distribuida del escurrimiento superficial, el modelo SWMM para la modelación de los conductos y canalizaciones y la cuenca del Río Cascavel, en el Municipio de Guarapuava, estado de Paraná, Brasil. Esta cuenca, tiene un área aproximada de 81 km², de la cual el 40 % aproximadamente está ocupada por la mancha urbana de Guarapuava.

TREX es un modelo distribuido de eventos, de base física, que simula los principales procesos hidrológicos, entre ellos precipitación, intercepción, escurrimiento superficial, en canales e infiltración. SWMM por otra parte es un modelo semidistribuido ampliamente difundido en casos de modelación hidrológica en ámbitos urbanos. Se aplicaron ambos modelos en conjunto y de manera complementaria para poder simular de manera integrada la cuenca del Río Cascavel con sus principales elementos característicos, como ser bocas de tormenta, conducciones abiertas y cerradas. Para ello, en primer lugar se realizó una modificación código fuente de TREX para poder simular las bocas de tormenta existentes en la cuenca.

Se realizó la calibración de los parámetros de dichos modelos para la cuenca del Río Cascavel utilizando cinco eventos históricos, obteniendo un aceptable ajuste de los parámetros con valores estadísticos de entre 0,54 a 0,94 para el coeficiente R², -0.65 a 0.90 para NSE y 0.19 % a 46.26 % para PBIAS. Se utilizaron otros cinco eventos para la validación del modelo calibrado obteniendo parámetros de ajuste de menor calidad pero aceptables.

Del trabajo se concluye que los modelos y el procedimiento establecido pueden ser utilizados en distintas cuencas urbanas ya que contempla todos los elementos que conforman a las mismas. Se deberá tener en cuenta los costos computacionales que puede llevar las modelaciones según la extensión de la cuenca y resolución adoptada. Como así también influye en la calidad de los resultados, la disponibilidad espacial y temporal de los datos de ingreso.

PALABRAS CLAVES: Modelación Hidrológica Distribuida, Hidrología Urbana, TREX, GRASS GIS, SWMM, Río Cascavel, Guarapuava.

Abstract

In this paper, the hydrological distributed modeling of a strongly anthropized basin is presented. For that purpose, the TREX model for the distributed modeling of surface runoff was selected, the SWMM model for the modeling of the ducts and channels and the Cascavel River basin, in the Municipality of Guarapuava, Paraná State, Brazil. This basin has an approximate area of 81 km². ; of which approximately 40% is occupied by the urban area of Guarapuava.

TREX is a distributed model of events based on physics, which simulates the main hydrological processes, including precipitation, interception, surface runoff, channels and infiltration. SWMM on the other hand is a semi-distributed model widely disseminated in cases of hydrological modeling in urban areas. The TREX and SWMM models were BOTH applied together and in a complementary way to be able to completely simulate the Cascavel River basin with all its characteristic elements, such as storm drains, open AND closed conducts, etc.

To do this, first of all, a modification of the TREX source code was made in order to simulate storm drains available in the basin. After the preparation of the entrance data and the construction of the model in TREX and in SWMM, the parameters of these models for the Cascavel River basin were calibrated using five historical events. In this calibration, an acceptable adjustment of the parameters was obtained, achieving statistical values of between 0.54 to 0.94 for the coefficient R², -0.65 to 0.90 for NSE and 0.19% to 46.26% for PBIAS. Five other events were used for the validation of the calibrated model, obtaining adjustment parameters of over quality but acceptable.

In conclusión from this work, the models and the established procedure can be used in different urban basins since they contemplate the elements that make up the same. It should be taken into account the computations costs used for modeling which depend on the extension of the basin and the resolution adopted. Moreover, this also influences the quality of the results, the spatial and temporal availability of the income data.

KEYWORDS: Distributed Hydrological Modeling, Urban Hydrology, TREX, GRASS GIS, SWMM, Rio Cascavel, Guarapuava.

Resumo

Neste trabalho, é apresentada a modelagem hidrológica distribuída de uma bacia fortemente urbanizada. Para o mesmo modelo para o escoamento superficial de modelagem TREX distribuído, modelo SWMM para modelar os tubos e condutas e bacia Cascavel rio no município de Guarapuava, PR, Brasil foi seleccionado. Esta bacia tem uma área aproximada de 81 km². De sua área total, 40% são ocupados pela área urbana de Guarapuava.

O TREX é um modelo distribuído de eventos, baseado em física, que simula os principais processos hidrológicos, incluindo precipitação, interceptação, escoamento superficial, canais e infiltração. O SWMM, por outro lado, é um modelo semi-distribuído amplamente disseminado em casos de modelagem hidrológica em áreas urbanas. Os TREX e SWMM modelos juntos e complementarmente aplicadas para simular completamente Bacia Cascavel com os seus elementos característicos, tais como drenos, bocas de lobo abertas, fechadas, etc. Para fazer isso, em primeiro lugar uma fonte infiltração módulo de modificação de T-REX foi realizada para simular o fluxo insumido e através das bocas do lobo existente na bacia, que são muito numerosos na bacia, de modo o seu efeito não é insignificante.

Após a elaboração dos dados de entrada e a construção do modelo no TREX e no SWMM, os parâmetros destes modelos para a bacia do rio Cascavel foram calibrados utilizando cinco eventos históricos. Em tais calibração foi obtido um parâmetro aceptbale atingir valores estatísticos entre 0,73-0,93 para o rácio R², -0,10 a 0,87 para NSE e 0,20% a 44,39% a PBIAS. Cinco eventos para os parâmetros de configuração de validação do modelo calibrado obtenção de uma qualidade inferior, mas aceitável foram utilizados.

A partir do trabalho conclui-se que os modelos e o procedimento estabelecido podem ser utilizados em diferentes bacias urbanas, uma vez que contempla todos os elementos que compõem o mesmo. Os custos de computação que a modelagem pode levar, dependendo da extensão da bacia e da resolução adotada, devem ser levados em consideração. Como isso também influencia a qualidade dos resultados, a disponibilidade espacial e temporal dos dados de renda.

PALAVRAS-CHAVE: Modelagem Hidrológica Distribuída, Hidrologia Urbana, TREX, GRASS, GIS, SWMM, Rio Cascavel, Guarapuava.

Índice de Contenido

<i>Resumen</i>	<i>iii</i>
<i>Abstract</i>	<i>v</i>
<i>Resumo</i>	<i>vii</i>
1. Capítulo 1: Introducción	- 1 -
1.1. Presentación de la Problemática	- 1 -
1.2. Objetivos del trabajo	- 2 -
1.2.1. Objetivo General	- 2 -
1.2.2. Objetivos Particulares.....	- 2 -
1.3. Contenido de la tesis	- 2 -
2. Capítulo 2: Marco teórico	- 5 -
2.1. Nociones de hidrología - ciclo hidrológico	- 5 -
2.2. Cuencas antropizadas - hidrología urbana	- 6 -
2.3. Estado del arte en las modelación hidrológica distribuida en cuencas urbanas	- 8 -
2.3.1. Modelos existentes	- 14 -
2.3.1.1. SWMM	- 14 -
2.3.1.2. XPSTORM/XPSWMM.....	- 16 -
2.3.1.3. PCSWMM.....	- 16 -
2.3.1.4. InfoWorks.....	- 17 -
2.3.1.5. Mike Urban.....	- 18 -
2.3.1.6. HIDRAS	- 19 -
2.3.1.7. Casc-2d-TREX	- 20 -
2.3.1.8. Multi-Hydro	- 21 -
2.3.1.9. Itzi	- 21 -
2.3.1.10. STORMCAD	- 22 -
2.3.1.11. CIVILSTORM	- 22 -
2.3.1.12. SEWSYS	- 22 -
2.3.1.13. MUSIC.....	- 23 -
2.3.1.14. SOBEK-URBAN.....	- 23 -
2.3.1.15. CANOE	- 25 -
2.1.1. Elección de modelo a utilizar	- 25 -
2.1.2. Estrategias e inconvenientes en la modelación hidrológica distribuida en áreas urbanas	- 26 -
2.2. Modelo seleccionado para la modelación distribuida del escurrimiento superficial: TREX	- 30 -
2.2.1. Descripción del modelo	- 31 -
2.2.2. Historia	- 31 -
2.2.3. Procesos hidrológicos considerados	- 32 -
2.2.3.1. Precipitación, intercepción y almacenamiento.....	- 32 -

2.2.3.2. Infiltración y pérdida de transmisión	33 -
2.2.3.3. Flujo superficial y en el canal.....	38 -
2.2.4. Modelación numérica.....	40 -
2.2.4.1. Solución explícita para la infiltración	40 -
2.2.4.2. Solución explícita del escurrimiento superficial (overland)	41 -
2.2.4.3. Solución explícita para el escurrimiento en cauces.....	42 -
2.2.5. Implementación computacional.....	44 -
2.3. Modelo seleccionado para la modelación hidráulica: SWMM	46 -
2.3.1. Descripción del modelo.....	46 -
2.3.1.1. Modelo conceptual utilizado en SWMM.....	46 -
2.3.1.2. Modelo hidráulico de transporte (Flow Routing).....	47 -
2.3.1.3. Componentes físicos (Visual Objects) utilizados	49 -
2.3.1.4. Componentes virtuales (sin representación gráfica) utilizados.....	53 -
2.3.1.5. Curvas (Curves)	53 -
2.3.1.6. Series temporales de datos (Serie Temporal).....	54 -
3. Capítulo 3: Área de estudio.....	55 -
3.1. Ubicación de la cuenca.....	55 -
3.2. Aspectos históricos de ocupación de la localidad de Guarapuava -	56 -
3.3. Geomorfología de la cuenca.....	57 -
3.4. Aspectos edafológicos	59 -
3.5. Aspectos climáticos.....	62 -
3.6. Uso del suelo.....	64 -
4. Capítulo 4: Metodología del trabajo.....	67 -
4.1. Modelación de área urbana con TREX y SWMM. Comparación de resultados	67 -
4.2. Modificación de código fuente de TREX.....	71 -
4.2.1. Validación de las modificaciones realizadas.....	82 -
4.3. Procedimiento de modelación en conjunto con TREX modificado y SWMM para aplicar en una cuenca fuertemente antropizada con un sector urbanizado. -	83 -
4.3.1. Aplicación del procedimiento a una pequeña área urbana	88 -
5. Capítulo 5: Información de base.....	91 -
5.1. Datos disponibles	91 -
5.1.1. Modelo digital de elevaciones.....	91 -
5.1.2. Datos pluviométricos y fluviométricos	96 -
5.1.2.1. Otros datos analizados para su aplicación.....	103 -
5.1.3. Tipo de suelo	106 -
5.1.3.1. Sectores con suelo impermeabilizado	106 -
5.1.3.2. Sectores de cauces de ríos naturales y lagos o lagunas.....	107 -

MODELACIÓN HIDROLÓGICA-HIDRÁULICA TOTALMENTE DISTRIBUIDA DE UNA CUENCA FUERTEMENTE ANTROPIZADA – CASO DEL RÍO CASCAVEL (GUARAPUAVA/PR, BRASIL)

5.1.3.3. Determinación de ubicación y tipo de bocas de tormenta existentes en la Cuenca del Rio Cascavel.....	- 109 -
5.1.4. Uso de suelo.....	- 114 -
5.2. Modelo realizado en TREX.....	- 116 -
5.2.1. Corrección del modelo digital de elevación.....	- 119 -
5.3. Modelo realizado en SWMM.....	- 124 -
6. Capítulo 6: Aplicación y resultados.....	- 131 -
6.1. Ideas generales.....	- 131 -
6.2. Calibraciones de eventos	- 131 -
6.2.1. Procedimiento de calibración utilizado	- 132 -
6.2.2. Eventos seleccionados	- 133 -
6.2.2.1. Aplicación de los datos de precipitación al modelo TREX.....	- 135 -
6.2.2.2. Procesamiento de los datos de caudal medido	- 137 -
6.2.3. Estadísticos para evaluar el ajuste de calibración.....	- 139 -
6.2.4. Estimación de parámetros de ajuste	- 140 -
6.2.4.1. Parámetros de Infiltración.....	- 140 -
6.2.4.2. Rugosidad e intercepción vegetal.....	- 141 -
6.2.4.3. Déficit de humedad de la cuenca.....	- 142 -
6.2.4.4. Forma y rugosidad de cauces y canales	- 143 -
6.2.4.5. Sección de conductos	- 143 -
6.3. Resultados de la calibración del modelo.....	- 149 -
6.4. Validación del modelo calibrado	- 159 -
6.5. Mapas resultados del modelo TREX y SWMM.....	- 167 -
7. Capítulo 7: Conclusiones y productos.....	- 173 -
7.1. Conclusiones.....	- 173 -
7.1.1. Conclusiones generales	- 173 -
7.1.2. Conclusiones particulares	- 174 -
7.1.3. Conclusiones finales.....	- 176 -
7.1.3.1. Trabajos futuros	- 178 -
7.2. Productos del trabajo.....	- 178 -
7.2.1. Becas.....	- 178 -
7.2.2. Asistencias a eventos científicos	- 179 -
7.2.3. Presentaciones	- 179 -
8. Capítulo 8: Bibliografía	- 181 -
9. Anexo I – Modificación del código fuente de TREX. Módulo infiltración	- 189 -
10. Anexo II – Validación de los cambios realizados en el cambio del código fuente.	- 203 -
11. Anexo III – Hidrogramas de crecida en distintos puntos de la cuenca.	- 213 -



11.1.	Evento 3.	- 214 -
11.2.	Evento 5.	- 218 -
11.3.	Evento 6.	- 222 -
11.4.	Evento 8.	- 226 -
11.5.	Evento 9.	- 230 -
11.6.	Evento 10.	- 234 -
11.7.	Evento 11.	- 238 -
11.8.	Evento 12.	- 242 -
11.9.	Evento 13.	- 246 -
11.10.	Evento 14.	- 250 -

Índice de Figuras

Figura 2-1 - Esquema de los procesos que componen el ciclo hidrológico (Chow et al., 1994).	- 6 -
Figura 2-2 - Esquema de procesos hidrológicos en cuenca rural y en una cuenca urbana (Riccardi, 1997).	- 7 -
Figura 2-3 - Esquema de componentes en una cuenca urbana (Riccardi, 1997).	- 8 -
Figura 2-4 - Tipos de modelos hidrológicos según su tratamiento espacial. A: modelo agregado. B: modelo semidistribuido. C: modelo totalmente distribuido (Sitterson, et al., 2017).	- 11 -
Figura 2-5 - Estructura modular de Mike Urban (DHI, 2017).	- 19 -
Figura 2-6 - Variación del coeficiente de impermeabilidad en un modelo totalmente distribuido de una cuenca urbana en función de la resolución utilizada (Ichiba, 2016).	- 27 -
Figura 2-7 - Relación entre la resolución a utilizar en un modelo totalmente distribuido y su desempeño (Ichiba, 2016).	- 30 -
Figura 2-8 - Símbolo del Modelo TREX.	- 31 -
Figura 2-9 - Zonas de humedad durante el proceso de infiltración (Chow et al, 1994).	- 35 -
Figura 2-10 - Variables que intervienen en el modelo Green & Ampt (Chow et al, 1994).	- 36 -
Figura 2-11 - Infiltración en una columna de suelo de área unitaria por el método de Green-Ampt (Chow et al, 1994).	- 37 -
Figura 2-12 - Esquema de cálculo en TREX. (HDR-HydroQual, 2011).	- 40 -
Figura 2-13 - Esquema de cálculo en las distintas celdas de superficie en TREX. (HDR-HydroQual, 2011).	- 43 -
Figura 2-14 - Mapa de cauces o links.	- 44 -
Figura 2-15 - Mapa de nodos que componen cada cauce.	- 44 -
Figura 2-16 - Visualización de la simulación de TREX en Windows.	- 45 -
Figura 3-1 - Mapa de ubicación del sector de estudio, Oliveira (2011). En azul, aproximadamente, el punto de aforo de la cuenca.	- 55 -
Figura 3-2 - Evolución de la población en el Municipio de Guarapuava. Adaptado de IBGE (2011).	- 57 -
Figura 3-3 - Curva clinográfica de la cuenca del Río Cascavel (Oliveira, 2011).	- 59 -
Figura 3-4 - Mapa de tipo de suelo de la cuenca del Río Cascavel (Gomes, 2014).	- 60 -
Figura 3-5 - Perfil edafológicos de los suelos predominantes de la cuenca del Río Cascavel. Adaptado de MINEROPAR, 1992 y Oliveira (2011).	- 61 -
Figura 3-6 - Casificación climática del Estado de Parana. Caviglione et al (2000), presentado por Oliveira (2011).	- 63 -
Figura 3-7 - Precipitaciones y temperaturas medias en el Municipio de Guarapuava. Datos: IAPAR (2011). Adaptado de Oliveira (2011).	- 64 -
Figura 3-8 - Uso de suelos en la cuenca del Rio Cascavel (Oliveira, 2011).	- 66 -
Figura 4-1 - Vista satelital de Barrio General Roca - En azul ferrocarril.	- 68 -
Figura 4-2 - Vista general de proyecto de cordón cuneta del barrio. En amarillo la ubicación de las bocas de tormenta proyectadas.	- 69 -
Figura 4-3 - Mapas utilizados en el modelo TREX y modelo SWMM. Arriba a la izquierda el Modelo digital de elevaciones sin modificaciones. Arriba a la derecha el modelo digital de elevaciones utilizado en TREX con sobre elevación de construcciones y descenso de cota a las celdas correspondientes a las calles. Abajo a la izquierda mapa de uso de suelo utilizado en TREX. Abajo a la derecha modelo utilizado en SWMM.	- 70 -
Figura 4-4 - Comparación de modelación con TREX y SWMM.	- 71 -
Figura 4-5 - Imágenes de los distintos tipos de boca de tormenta. De izquierda a derecha, boca de tormenta vertical en cordón, horizontal y combinada.	- 72 -
Figura 4-5 - Relación entre h_{celda} y $h_{cordón}$.	- 77 -

<i>Figura 4-6 - Coeficiente empírico de ecuación de Neenah, presentada por Riccardi (2004).</i>	<i>- 78 -</i>
<i>Figura 4-7 - Relación entre el factor adimensional K y la pendiente longitudinal.</i>	<i>- 79 -</i>
<i>Figura 4-8 - Esquema de cambios realizados en el código fuente de TREX. Módulo infiltración.</i>	<i>81</i>
<i>Figura 4-9 - Mapa de tipo de suelo a utilizar en TREX con agregado de bocas de tormenta.</i>	<i>- 84 -</i>
<i>Figura 4-10 – Esquema del acoplamiento del modelo TREX y SWMM. En verde las celdas correspondiente al escurrimiento superficial en TREX, en celeste las celdas correspondientes a los cauces. En azul el caudal infiltrado en las celdas cauces que es ingresado a los nodos cauces de SWMM.</i>	<i>85</i>
<i>Figura 4-11 – Esquema básico de la relación entre el modelo TREX y SWMM en sector urbano. Transferencia de los caudales captados por las bocas de tormentas en el modelo SWMM.</i>	<i>87</i>
<i>Figura 4-12 - Esquema del procedimiento de modelación con TREX y SWMM en conjunto.</i>	<i>- 88 -</i>
<i>Figura 4-13 - Mapas de ingreso para la modelación de la cuenca de Cascavel en TREX. De izquierda a derecha: curvas de nivel de la cuenca utilizadas para producir MDE, MDE, mapa de uso de suelo y mapa de tipo de suelo.</i>	<i>- 89 -</i>
<i>Figura 4-14 - Izquierda: visualización del MDE del sector a modelar. Las celdas negras corresponden a las bocas de tormenta. Derecha: modelo utilizado en SWMM.</i>	<i>- 90 -</i>
<i>Figura 4-15 - Hidrogramas obtenidos al aplicar TREX en una cuenca urbana sin tener en cuenta bocas de tormenta y conductos en comparación con la utilización de TREX en conjunto con SWMM.</i>	<i>- 90 -</i>
<i>Figura 5-1 - Vista de los puntos medidos en la cuenca del Rio Cascavel y curvas de nivel utilizadas para la confección del MDE.</i>	<i>- 92 -</i>
<i>Figura 5-2 - MDE de la cuenca del Rio Cascavel - Resolución 5 m x 5 m.</i>	<i>- 93 -</i>
<i>Figura 5-3 - Mapa de calles utilizado para modificar el MDE.</i>	<i>- 94 -</i>
<i>Figura 5-4 - Mapa auxiliar para modificar el MDE.</i>	<i>- 95 -</i>
<i>Figura 5-5 - Porción del MDE de la cuenca del Rio Cascavel modificado.</i>	<i>- 95 -</i>
<i>Figura 5-6 – Curva H-Q de la estación fluviométrica Foz do Rio Cascavel.</i>	<i>- 98 -</i>
<i>Figura 5-7 – Vista de la estación fluviográfica en una crecida.</i>	<i>- 98 -</i>
<i>Figura 5-8 – Realización de aforo en sector de la estación fluviométrica.</i>	<i>- 99 -</i>
<i>Figura 5-9 – Vista en detalle de la estación fluviométrica.</i>	<i>- 99 -</i>
<i>Figura 5-10 – Vista desde aguas abajo hacia aguas arriba de estación fluviométrica.</i>	<i>- 100 -</i>
<i>Figura 5-11 - Ubicación de estaciones de precipitaciones en la zona de la Cuenca del Río Cascavel. -</i>	<i>103</i>
<i>Figura 5-12 - Imágen de datos de radar disponible en zona de estudio.</i>	<i>- 104 -</i>
<i>Figura 5-13 - Ejemplo de imágen del satelite GOES 13.</i>	<i>- 105 -</i>
<i>Figura 5-14 - Visualización de la página web disponible para la descarga de datos del Hidroestimador.</i>	<i>- 105 -</i>
<i>Figura 5-15 - Base de datos de imágenes espaciales procesadas.</i>	<i>- 106 -</i>
<i>Figura 5-16 - Modificación del mapa de tipo de suelo inicial con el agregado de áreas impermeables. ...</i>	<i>107 -</i>
<i>Figura 5-17 - Modificación del mapa de tipo de suelo inicial con el agregado de tipo de suelo correspondiente a cauces.</i>	<i>- 108 -</i>
<i>Figura 5-18 - Modificación del mapa de tipo de suelo inicial con el agregado de tipo de suelo correspondientes a embalses.</i>	<i>- 108 -</i>
<i>Figura 5-19 - Visualización de bocas de tormenta de la localidad de Guarapuava en Street View. -</i>	<i>109 -</i>
<i>Figura 5-20 - Porcentaje de tipo de bocas de tormenta en la ciudad de Guarapuava.</i>	<i>- 110 -</i>
<i>Figura 5-21 - Bocas de tormenta relevadas en la localidad de Guarapuava (puntos en color verde, representan bocas de tormenta identificadas in situ)</i>	<i>- 111 -</i>
<i>Figura 5-22 - Detalle de bocas de tormenta relevadas por Street View (lila) y verificadas in situ (azul).</i>	<i>- 112 -</i>

MODELACIÓN HIDROLÓGICA-HIDRÁULICA TOTALMENTE DISTRIBUIDA DE UNA CUENCA FUERTEMENTE ANTROPIZADA – CASO DEL RÍO CASCAVEL (GUARAPUAVA/PR, BRASIL)

Figura 5-23 - Detalle de bocas de diferencias entre bocas tormenta relevadas por Street View y verificadas in situ. Verificación en Street View.	- 112 -
Figura 5-24 - Detalle de bocas de diferencias entre bocas tormenta relevadas por Street View y verificadas in situ. Verificación en Street View.	- 113 -
Figura 5-25 - Mapa de tipo de suelo con el agregado de las bocas de tormenta.	- 113 -
Figura 5-26 - Mapa de tipo de suelo con las modificaciones agregadas.	- 114 -
Figura 5-27 – Porcentaje de sector ocupado por cada tipo de suelo adoptado en la Cuenca del Río Cascavel.	- 114 -
Figura 5-28 - Mapa de uso de suelo obtenido para la modelación en TREX.	- 115 -
Figura 5-29 – Porcentaje de sector ocupado por cada uso de suelo adoptado en la Cuenca del Río Cascavel.	- 115 -
Figura 5-30 – Esquema del acoplamiento del modelo TREX y SWMM. En verde las celdas correspondiente al escurrimiento superficial en TREX, en celeste las celdas correspondientes a los cauces. Con línea roja las subcuencas modeladas en TREX. En azul el caudal infiltrado en las celdas cauces que es ingresado a los nodos cauces de SWMM.	- 118 -
Figura 5-31 - División de la Cuenca del Río Cascavel en distintas subcuencas. El punto amarillo indica la ubicación de la estación pluviométrica – fluviométrica Foz do Rio Cascavel.	- 119 -
Figura 5-32 - A la izquierda sector del modelo digital de elevación - A la derecha sector del mapa de escurrimiento superficial.	- 120 -
Figura 5-33 - A la izquierda sector del modelo digital de elevación - A la derecha sector del mapa de escurrimiento superficial.	- 120 -
Figura 5-34 - Caso de modelo digital de elevación previo a corrección automática. En amarillo, la celda de elevación de origen del escurrimiento, en azul celda que debería recibir el escurrimiento en diagonal y en rojo celda “alta” a corregir.	- 121 -
Figura 5-35 - Caso de modelo digital de elevación previo a corrección automática. En amarillo, la celda de elevación de origen del escurrimiento, en azul celda que debería recibir el escurrimiento en diagonal y en verde celda “alta” corregida.	- 121 -
Figura 5-36 - Variación de volumen infiltrado según cantidad de celdas intervenidas. Subcuenca arroyo Barro Preto.	- 123 -
Figura 5-37 - Volumen de agua en celdas con tirante mayor a 0,2 cm con respecto a volumen precipitado. Subcuenca arroyo Barro Preto.	- 123 -
Figura 5-38 – Esquema de red de drenaje pluvial utilizada. Se trata de una malla cerrada (looped network) compuesta por los conductos pluviales bajo las calles, los cuales descargan a los nodos cauces. En negro los nodos y conductos coincidente con las calles. En azul nodos y conductos coincidentes con los cauces y en rojo los conductos enlace. En celeste se indica el sentido del flujo que dependerá de las cotas de los nodos.	- 126 -
Figura 5-39 – Esquema básico de la relación entre el modelo TREX y SWMM en sector urbano. Transferencia de los caudales captados por las bocas de tormentas en el modelo SWMM.	- 128 -
Figura 5-40 - Detalle de un sector del modelo en SWMM.	- 129 -
Figura 5-41 - Visualización del modelo SWMM de toda la cuenca del Río Cascavel.	- 130 -
Figura 6-1 - Distribución espacial de intensidad de precipitaciones para el evento 3 a las 0,75 horas de simulación (izquierda) y a las 2,0 horas de simulación (derecha).	- 136 -
Figura 6-2 - Método de Barnes (Orsolini et al., 2000).	- 138 -
Figura 6-3 - Caudales medidos en estación Cascavel - Evento 3.	- 138 -
Figura 6-4 - Extracción e caudal base por método de Barnes para el Evento 3.	- 139 -
Figura 6-5 - Escurrimiento superficial medido en el Evento 3 luego del procesamiento por método de Barnes.	- 139 -
Figura 6-6 – Comparación de caudales simulados para el Evento 8 con una red de drenaje de sección circular de 800 mm con respecto a los caudales simulados con la red de drenaje adoptada.	- 144 -

<i>Figura 6-7 – Comparación de caudales simulados para el Evento 8 con una red de drenaje de sección circular de 1000 mm con respecto a los caudales simulados con la red de drenaje adoptada.</i>	- 145 -
<i>Figura 6-8 - Vista de cauce modificado por el hombre dentro de la localidad de Guarapuava.</i>	- 145 -
<i>Figura 6-9 - Mapa elaborado por Oliveira (2011) de las modificaciones de los cauces en la Subcuenca Barro Preto. En verde sector no modificado, en rojo cauce canalizado y en amarillo cauce parcialmente modificado.....</i>	- 146 -
<i>Figura 6-10 - Sector de la subcuenca Barro Preto en SWMM donde se observan los conductos canalizados.....</i>	- 146 -
<i>Figura 6-11 - Mapa elaborado por Oliveira (2011) de las modificaciones de los cauces en la Subcuenca Carro Quebrado. En verde sector no modificado, en rojo cauce canalizado y en amarillo cauce parcialmente modificado.....</i>	- 147 -
<i>Figura 6-12 - Sector de la subcuenca Carro Quebrado en SWMM donde se observan los conductos canalizados.....</i>	- 147 -
<i>Figura 6-13 - Mapa elaborado por Oliveira (2011) de las modificaciones de los cauces en la Subcuenca Arroio Engenho. En verde sector no modificado, en rojo cauce canalizado y en amarillo cauce parcialmente modificado.....</i>	- 148 -
<i>Figura 6-14 - Sector de la subcuenca Engenho en SWMM donde se observan los conductos canalizados.....</i>	- 148 -
<i>Figura 6-15 - Caudales simulados y caudales medidos en el evento 3.....</i>	153
<i>Figura 6-16 - Caudales simulados y caudales medidos en el evento 5.....</i>	- 154 -
<i>Figura 6-17 - Caudales simulados y caudales medidos en el evento 6.....</i>	155
<i>Figura 6-18 - Caudales simulados y caudales medidos en el evento 8.....</i>	- 156 -
<i>Figura 6-19 - Caudales simulados y caudales medidos en el evento 9.....</i>	- 157 -
<i>Figura 6-20 - Gráficos de correlación de cada uno de los eventos calibrados En rojo, la línea que representa un ajuste perfecto.</i>	- 158 -
<i>Figura 6-21 - Caudal simulado vs caudal medido para el evento de validación. Evento 10.</i>	- 161 -
<i>Figura 6-22 - Caudal simulado vs caudal medido para el evento de validación. Evento 11.</i>	- 162 -
<i>Figura 6-23 - Caudal simulado vs caudal medido para el evento de validación. Evento 12.</i>	- 163 -
<i>Figura 6-24 - Caudal simulado vs caudal medido para el evento de validación. Evento 13.</i>	- 165 -
<i>Figura 6-25 - Caudal simulado vs caudal medido para el evento de validación. Evento 14.</i>	- 165 -
<i>Figura 6-26 - Gráficos de correlación de cada uno de los eventos utilizados para la validación del modelo. En rojo la línea que representa un ajuste exacto.</i>	- 166 -
<i>Figura 6-27 - A la izquierda altura de escurrimiento (m) para el Evento 6 en TREX. A la derecha caudal (m³/s) en conductos y canales en SWMM. Tiempo: 1 hora.....</i>	- 167 -
<i>Figura 6-28 - A la izquierda altura de escurrimiento (m) para el Evento 6 en TREX. A la derecha caudal (m³/s) en conductos y canales en SWMM. Tiempo: 2 horas.....</i>	- 167 -
<i>Figura 6-29 - A la izquierda altura de escurrimiento (m) para el Evento 6 en TREX. A la derecha caudal (m³/s) en conductos y canales en SWMM. Tiempo: 3 horas.....</i>	- 168 -
<i>Figura 6-30 - A la izquierda altura de escurrimiento (m) para el Evento 6 en TREX. A la derecha caudal (m³/s) en conductos y canales en SWMM. Tiempo: 4 horas.....</i>	- 168 -
<i>Figura 6-31 - A la izquierda altura de escurrimiento (m) para el Evento 6 en TREX. A la derecha caudal (m³/s) en conductos y canales en SWMM. Tiempo: 5 horas.....</i>	- 169 -
<i>Figura 6-32 - A la izquierda altura de escurrimiento (m) para el Evento 6 en TREX. A la derecha caudal (m³/s) en conductos y canales en SWMM. Tiempo: 6 horas.....</i>	- 169 -
<i>Figura 6-33 - Arriba vista de altura de escurrimiento en TREX para el Evento 6 en un sector de la subcuenca Barro Preto. En el centro vista de SWMM del mismo sector. Tiempo: 4 horas. Abajo vista de imagen satelital del sector visualizado en TREX y SWMM.....</i>	- 170 -
<i>Figura 6-34 - Visualización de caudal en conducto visualizado en SWMM.....</i>	- 171 -

MODELACIÓN HIDROLÓGICA-HIDRÁULICA TOTALMENTE DISTRIBUIDA DE UNA CUENCA FUERTEMENTE ANTROPIZADA – CASO DEL RÍO CASCAVEL (GUARAPUAVA/PR, BRASIL)

Figura 10-1 - Ejemplo 5.8 de Mays (2004).....	- 203 -
Figura 10-2 - Modelo digital de elevación para representar ejemplo teórico.....	- 204 -
Figura 10-3 - Tipo de suelo del modelo.....	- 204 -
Figura 10-4 - Indicación de características de la boca de tormenta vertical en el archivo input. ...	- 205 -
Figura 10-5 - Salida del modelo en TREX, caudal pasante [m ³ /s].....	- 205 -
Figura 10-6 - Mapa de salida de velocidad de infiltración para el tiempo 2.1 de simulación en [mm/h]. -	205 -
Figura 10-7 - Caudal pasante en el punto más bajo de la cuenca.....	- 206 -
Figura 10-8 - Mapa de velocidades de infiltración [mm/h].....	- 207 -
Figura 10-9 - MDE de boca de tormenta en punto bajo, con posibilidad de caudal pasante a celda aguas abajo.....	- 208 -
Figura 10-10 - Mapa de altura de escurrimiento en el modelo TREX, tiempo de simulación: 3,4 horas. ...	208 -
Figura 10-11 - Mapa de altura de escurrimiento.....	- 209 -
Figura 10-12 - Obtención de una relación para K para bocas de tormenta en punto bajo.....	- 210 -
Figura 10-13 - Mapa de altura de escurrimiento.....	- 211 -
Figura 11-1 - Puntos de extracción de caudales en cada modelación.....	- 213 -
Figura 11-2 - Evento 3. Hidrograma de salida de la subcuenca del Arroio Monjolo.....	- 214 -
Figura 11-3 - Evento 3. Hidrograma de salida de la subcuenca del Arroio Barro Preto.....	- 214 -
Figura 11-4 - Evento 3. Hidrograma de salida de la subcuenca del Arroio Carro Quebrado.....	- 215 -
Figura 11-5 - Evento 3. Hidrograma de salida de la subcuenca del Arroio Engenho.....	- 215 -
Figura 11-6 - Evento 3. Hidrograma de salida en el Río Cascavel, sector norte.....	- 216 -
Figura 11-7 - Evento 3. Hidrograma de salida en el Río Cascavel, aguas abajo de Arroio Barro Preto....	- 216 -
Figura 11-8 - Evento 3. Hidrograma de salida en el Río Cascavel, aguas abajo de Arroio Carro Quebrado.....	- 217 -
Figura 11-9 - Evento 3. Hidrograma de salida en el Río Cascavel, aguas abajo de Arroio Engenho. -	217 -
Figura 11-10 - Evento 5. Hidrograma de salida de la subcuenca del Arroio Monjolo.....	- 218 -
Figura 11-11 - Evento 5. Hidrograma de salida de la subcuenca del Arroio Barro Preto.....	- 218 -
Figura 11-12 - Evento 5. Hidrograma de salida de la subcuenca del Arroio Carro Quebrado.....	- 219 -
Figura 11-13 - Evento 5. Hidrograma de salida de la subcuenca del Arroio Engenho.....	- 219 -
Figura 11-14 - Evento 5. Hidrograma de salida Río Cascavel, sector norte.....	- 220 -
Figura 11-15 - Evento 5. Hidrograma de salida Río Cascavel, aguas abajo del Arroio Barro Preto. -	220 -
Figura 11-16 - Evento 5. Hidrograma de salida Río Cascavel, aguas abajo del Arroio Carro Quebrado..	- 221 -
Figura 11-17 - Evento 5. Hidrograma de salida Río Cascavel, aguas abajo del Arroio Engenho. ...	- 221 -
Figura 11-18 - Evento 6. Hidrograma de salida de subcuenca Arroio Monjolo.....	- 222 -
Figura 11-19 - Evento 6. Hidrograma de salida de subcuenca Arroio Barro Preto.....	- 222 -
Figura 11-20 - Evento 6. Hidrograma de salida de subcuenca Arroio Carro Quebrado.....	- 223 -
Figura 11-21 - Evento 6. Hidrograma de salida de subcuenca Arroio Engenho.....	- 223 -
Figura 11-22 - Evento 6. Hidrograma de salida Río Cascavel, sector norte.....	- 224 -
Figura 11-23 - Evento 6. Hidrograma de salida Río Cascavel, aguas abajo de Arroio Barro Preto.-	224 -
Figura 11-24 - Evento 6. Hidrograma de salida Río Cascavel, aguas abajo de Arroio Carro Quebrado...-	225 -
Figura 11-25 - Evento 6. Hidrograma de salida Río Cascavel, aguas abajo de Arroio Engenho.....	- 225 -
Figura 11-26 - Evento 8. Hidrograma de salida subcuenca Arroio Monjolo.....	- 226 -
Figura 11-27 - Evento 8. Hidrograma de salida subcuenca Arroio Barro Preto.....	- 226 -
Figura 11-28 - Evento 8. Hidrograma de salida subcuenca Arroio Carro Quebrado.....	- 227 -

<i>Figura 11-29 – Evento 8. Hidrograma de salida subcuenca Arroio Engenho.....</i>	<i>- 227 -</i>
<i>Figura 11-30 – Evento 8. Hidrograma de salida Río Cascavel, sector Norte.....</i>	<i>- 228 -</i>
<i>Figura 11-31 – Evento 8. Hidrograma de salida Río Cascavel, aguas abajo de Arroio Barro Preto.-</i>	<i>228 -</i>
<i>Figura 11-32 – Evento 8. Hidrograma de salida Río Cascavel, aguas abajo de Arroio Quebrado....</i>	<i>- 229 -</i>
<i>Figura 11-33 – Evento 8. Hidrograma de salida Río Cascavel, aguas abajo de Arroio Engenho.....</i>	<i>- 229 -</i>
<i>Figura 11-34 – Evento 9. Hidrograma de salida subcuenca Arroio Monjolo.....</i>	<i>- 230 -</i>
<i>Figura 11-35 – Evento 9. Hidrograma de salida subcuenca Arroio Barro Preto.</i>	<i>- 231 -</i>
<i>Figura 11-36 – Evento 9. Hidrograma de salida subcuenca Arroio Carro Quebrado.....</i>	<i>- 231 -</i>
<i>Figura 11-37 – Evento 9. Hidrograma de salida subcuenca Arroio Engenho.....</i>	<i>- 231 -</i>
<i>Figura 11-38 – Evento 9. Hidrograma de salida Río Cascavel, sector Norte.....</i>	<i>- 232 -</i>
<i>Figura 11-39 – Evento 9. Hidrograma de salida Río Cascavel, aguas abajo del Arroio Barro Preto. -</i>	<i>232</i>
<i>-</i>	
<i>Figura 11-40 – Evento 9. Hidrograma de salida Río Cascavel, aguas abajo del Arroio Carro Quebrado..-</i>	<i>233 -</i>
<i>Figura 11-41 – Evento 9. Hidrograma de salida Río Cascavel, aguas abajo del Arroio Engenho. ...</i>	<i>- 233 -</i>
<i>Figura 11-42 – Evento 10. Hidrograma de salida subcuenca Arroio Monjolo.</i>	<i>- 234 -</i>
<i>Figura 11-43 – Evento 10. Hidrograma de salida subcuenca Arroio Barro Preto.....</i>	<i>- 234 -</i>
<i>Figura 11-44 – Evento 10. Hidrograma de salida subcuenca Arroio Carro Quebrado.</i>	<i>- 235 -</i>
<i>Figura 11-45 – Evento 10. Hidrograma de salida subcuenca Arroio Engenho.</i>	<i>- 235 -</i>
<i>Figura 11-46 – Evento 10. Hidrograma de salida Río Cascavel, sector Norte.....</i>	<i>- 236 -</i>
<i>Figura 11-47 – Evento 10. Hidrograma de salida Río Cascavel, aguas abajo de Arroio Barro Preto.-</i>	<i>236</i>
<i>-</i>	
<i>Figura 11-48 – Evento 10. Hidrograma de salida Río Cascavel, aguas abajo de Arroio Carro Quebrado.-</i>	<i>237 -</i>
<i>Figura 11-49 – Evento 10. Hidrograma de salida Río Cascavel, aguas abajo de Arroio Engenho... -</i>	<i>237 -</i>
<i>Figura 11-50 – Evento 11. Hidrograma de salida subcuenca Arroio Monjolo.</i>	<i>- 238 -</i>
<i>Figura 11-51 – Evento 11. Hidrograma de salida subcuenca Arroio Barro Preto.....</i>	<i>- 238 -</i>
<i>Figura 11-52 – Evento 11. Hidrograma de salida subcuenca Arroio Carro Quebrado.</i>	<i>- 239 -</i>
<i>Figura 11-53 – Evento 11. Hidrograma de salida subcuenca Arroio Engenho.</i>	<i>- 239 -</i>
<i>Figura 11-54 – Evento 11. Hidrograma de salida Río Cascavel, sector Norte.....</i>	<i>- 240 -</i>
<i>Figura 11-55 – Evento 11. Hidrograma de salida Río Cascavel, aguas abajo de Arroio Barro Preto.-</i>	<i>240</i>
<i>-</i>	
<i>Figura 11-56 – Evento 11. Hidrograma de salida Río Cascavel, aguas abajo de Arroio Carro Quebrado.-</i>	<i>241 -</i>
<i>Figura 11-57 – Evento 11. Hidrograma de salida Río Cascavel, aguas abajo de Arroio Engenho. ...</i>	<i>- 241 -</i>
<i>Figura 11-58 – Evento 12. Hidrograma de salida subcuenca Arroio Monjolo.</i>	<i>- 242 -</i>
<i>Figura 11-59 – Evento 12. Hidrograma de salida subcuenca Arroio Barro Preto.....</i>	<i>- 242 -</i>
<i>Figura 11-60 – Evento 12. Hidrograma de salida subcuenca Arroio Carro Quebrado.</i>	<i>- 243 -</i>
<i>Figura 11-61 – Evento 12. Hidrograma de salida subcuenca Arroio Engenho.</i>	<i>- 243 -</i>
<i>Figura 11-62 – Evento 12. Hidrograma de salida Río Cascavel, sector Norte.....</i>	<i>- 244 -</i>
<i>Figura 11-63 – Evento 12. Hidrograma de salida Río Cascavel, aguas abajo Arroio Barro Preto... -</i>	<i>244 -</i>
<i>Figura 11-64 – Evento 12. Hidrograma de salida Río Cascavel, aguas abajo Arroio Carro Quebrado.-</i>	<i>245 -</i>
<i>Figura 11-65 – Evento 12. Hidrograma de salida Río Cascavel, aguas abajo Arroio Engenho.</i>	<i>- 245 -</i>
<i>Figura 11-66 – Evento 13. Hidrograma de salida subcuenca Arroio Monjolo.</i>	<i>- 246 -</i>
<i>Figura 11-67 – Evento 13. Hidrograma de salida subcuenca Arroio Barro Preto.....</i>	<i>- 246 -</i>
<i>Figura 11-68 – Evento 13. Hidrograma de salida subcuenca Arroio Carro Quebrado.</i>	<i>- 247 -</i>
<i>Figura 11-69 – Evento 13. Hidrograma de salida subcuenca Arroio Engenho.</i>	<i>- 247 -</i>

MODELACIÓN HIDROLÓGICA-HIDRÁULICA TOTALMENTE DISTRIBUIDA DE UNA CUENCA FUERTEMENTE ANTROPIZADA – CASO DEL RÍO CASCAVEL (GUARAPUAVA/PR, BRASIL)

Figura 11-70 – Evento 13. Hidrograma de salida Río Cascavel, Sector Norte. - 248 -
Figura 11-71 – Evento 13. Hidrograma de salida Río Cascavel, aguas abajo de Arroio Barro Preto.- 248 -
-
Figura 11-72 – Evento 13. Hidrograma de salida Río Cascavel, aguas abajo de Arroio Carro Quebrado.- 249 -
Figura 11-73 – Evento 13. Hidrograma de salida Río Cascavel, aguas abajo de Arroio Engenho... - 249 -
Figura 11-74 – Evento 14. Hidrograma de salida Subcuenca Arroio Monjolo..... - 250 -
Figura 11-75 – Evento 14. Hidrograma de salida Subcuenca Arroio Barro Preto. - 250 -
Figura 11-76 – Evento 14. Hidrograma de salida Subcuenca Arroio Carro Quebrado..... - 251 -
Figura 11-77 – Evento 14. Hidrograma de salida Subcuenca Arroio Engenho. - 251 -
Figura 11-78 – Evento 14. Hidrograma de salida Río Cascavel, sector Norte. - 252 -
Figura 11-79 – Evento 14. Hidrograma de salida Río Cascavel, aguas abajo Arroio Barro Preto... - 252 -
Figura 11-80 – Evento 14. Hidrograma de salida Río Cascavel, aguas abajo Arroio Carro Quebrado. - 253 -
Figura 11-81 – Evento 14. Hidrograma de salida Río Cascavel, aguas abajo Arroio Engenho. - 253 -

Índice de Tablas

Tabla 3-1 - Características principales de la Cuenca del Río Cascavel. Adaptada de Oliveira (2011).	- 59
-	
Tabla 4-1 - Tipo de Suelos reservados para bocas de tormenta.	- 73 -
Tabla 4-2 - Variables utilizadas en TREX modificado para modelar bocas de tormentas.	- 73 -
Tabla 4-3 - Determinación del $h_{\text{cordón}}$ en función del tamaño de las celdas.	- 76 -
Tabla 4-4 - Factor adimensional K dependiendo S_b , fijando $S_e = 2\%$.	- 78 -
Tabla 4-5 - Comparación de cálculo teórico y cálculo en TREX de diferentes tipo de bocas de tormenta	- 82 -
Tabla 5-1 - Datos de precipitaciones utilizados en el trabajo.	- 96 -
Tabla 5-2 - Aforos realizados en estación fluviométrica Foz do Rio Cascavel.	- 97 -
Tabla 5-3 - Estaciones pluviográficas, pluviométricas y pluviográficas de la zona de Estudio.	- 101 -
Tabla 5-4 - Cantidad y Tipo de Boca de Tormentas	- 109 -
Tabla 5-5 - Tamaño de las distintas subcuencas utilizadas.	- 117 -
Tabla 5-6 - Variables analizadas según correcciones al MDE de la subcuenca arroyo Barro Preto.	- 122 -
-	
Tabla 5-7 - Celdas corregidas en cada subcuenca.	- 124 -
Tabla 5-8 - Características principales del modelo SWMM para la cuenca completa.	- 129 -
Tabla 5-9 - Cantidad de nodos cauces y bocas de tormenta en las distintas subcuencas.	- 129 -
Tabla 6-1 - Eventos seleccionados para realizar la calibración del modelo.	- 134 -
Tabla 6-2 - Eventos seleccionados para realizar la validación del modelo.	- 134 -
Tabla 6-3 - Ejemplo de cálculo de las precipitaciones en las estaciones pluviométricas para los distintos intervalos de tiempo.	- 135 -
Tabla 6-4 - Precipitaciones media caída en la Cuenca del Río Cascavel en cada evento.	- 136 -
Tabla 6-5 - Valores calibrados de los parámetros de infiltración del modelo TREX.	- 141 -
Tabla 6-6 - Valores calibrados para la rugosidad superficial en el modelo TREX.	- 141 -
Tabla 6-7 - Rango de coeficientes de rugosidad de Manning para flujo superficial recopilados de los trabajos de Du, et al. (2008), Cronshey, (1986), Kalyanapu, et al. (2010) y Barros (2012).	- 142 -
Tabla 6-8 - Rango de valores de intercepción utilizados en los distintos eventos.	- 142 -
Tabla 6-9 - Déficit de humedad de la cuenca ajustado para cada evento utilizado para la calibración.	- 143 -
Tabla 6-10 - Valores estadísticos obtenidos en el proceso de calibración.	- 150 -
Tabla 6-11 - Análisis de diferencias entre volumen escurridos y caudales picos medidos y simulados para los eventos de calibración.	- 151 -
Tabla 6-12 - Tiempo de ocurrencia de caudal pico de crecida en hidrograma medido y simulado para los eventos de calibración.	- 151 -
Tabla 6-13 - Valores estadístico del ajuste obtenidos en los eventos de validación.	- 159 -
Tabla 6-14 - Análisis de volúmenes escurridos y caudales picos medidos y simulados en los eventos de validación.	- 160 -
Tabla 6-15 - Tiempo de ocurrencia de caudal pico de crecida en hidrograma medido y simulado para los eventos de calibración.	- 160 -
Tabla 10-1 - Comparación de cálculo teórico y cálculo en TREX de boca de tormenta vertical.	- 206 -

Índice de Símbolos

A	= Área.
A_c	= Área transversal del flujo.
A_s	= Superficie del área donde ocurre la precipitación.
A_u	= Área de la abertura horizontal de la boca de tormenta.
a	= constante experimental = 21.
a_1, a_2	= dimensiones internas de la reja.
a_e	= Constante experimentalmente determinada = $8,4 \times 10^{-3}$.
B_x, B_y	= Ancho escurrimiento en dirección x ó y.
d	= Duración de tormenta de diseño.
E	= Velocidad de evaporación.
F	= Altura acumulada de agua infiltrada.
f	= Tasa de infiltración.
g	= Aceleración de la gravedad.
H_c	= Altura de presión capilar de succión.
h	= Altura de agua en la superficie.
h_b	= Altura de boca de tormenta.
i_e	= Intensidad de precipitación en exceso.
i_g	= Intensidad bruta de precipitación.
i_n	= Intensidad neta (efectiva) en la superficie.
K_h	= Conductividad hidráulica efectiva.
K_{neenah}	= Coeficiente empírico para cálculo de caudal insumido en boca de tormenta horizontal.
K_s	= Conductividad hidráulica saturada.
L_c	= Longitud propuesta de la abertura del cordón.
L_t	= Longitud teórica requerida.

m	= Constante determinada experimentalmente = 0,024.
n	= Coeficiente de rugosidad de Manning.
n_a	= Número de aberturas de boca de tormenta horizontal.
P_c	= Perímetro mojado del canal.
P_R	= Perímetro vertedor de la reja P_R
Q	= Caudal líquido.
Q_i	= Caudal teórico a interceptar por la boca de tormenta.
Q_0	= Caudal circulando por la cuneta.
Q_x, Q_y	= Caudal en dirección x ó y.
q_l	= Caudal lateral unitario (entrando o saliendo del canal).
q_p	= Caudal pico.
q_x, q_y	= Descarga unitaria en dirección x ó y = $Q_x / B_x, Q_y / B_y$.
R_h	= Radio hidráulico = A_c / P_c .
S_e	= Pendiente transversal en la cuneta de la boca.
S_i	= Capacidad de intercepción proyectada por la cubierta vegetal por unidad de área.
S_l	= Pendiente longitudinal de la calle.
S_o	= Pendiente media de la cuenca.
S_{fx}, S_{fy}	= Pendiente de fricción (línea de gradiente de energía) en dirección x ó y.
S_{0x}, S_{0y}	= Pendiente de la superficie del terreno en dirección x ó y.
$s _t$	= Valor de la variable del modelo en el tiempo t .
$s _{t+\Delta t}$	= Valor de la variable del modelo en el tiempo $t + \Delta t$.
T	= Altura acumulada de agua transportada por pérdida de transmisión.
t	= Tiempo.

MODELACIÓN HIDROLÓGICA-HIDRÁULICA TOTALMENTE DISTRIBUIDA DE UNA CUENCA FUERTEMENTE ANTROPIZADA – CASO DEL RÍO CASCAVEL (GUARAPUAVA/PR, BRASIL)

t_b	= Espesor de barrotes de boca de tormenta horizontal.
t_l	= Tasa de pérdida de transmisión.
V	= Volumen de escorrentía de la tormenta (m ³).
V_g	= Volumen bruto de precipitación.
V_i	= Volumen interceptado.
V_n	= Volumen neto.
V_v	= Volumen de vacíos por unidad.
W	= Descarga unitaria desde/hacia punto fuente/sumidero.
z	= Pendiente transversal de la cuneta.
y_o	= Tirante de agua en el cordón.
α_x, α_y	= Coeficiente de resistencia al flujo en dirección x ó y.
β	= Exponente de resistencia = 5/3.
β_s	= Exponente del caudal.
γ_s	= Exponente para gradiente local de energía.
θ	= Contenido de humedad del suelo.
θ_e	= Porosidad efectiva del suelo = $(\varphi - \theta_r)$
θ_r	= Contenido residual de humedad del suelo.
θ_S	= Humedad de saturación del suelo.
λ	= Índice de distribución del tamaño del poro del suelo (adimensional).
φ	= Porosidad total del suelo.
ψ_b	= presión de “burbujeo” (bubbling pressure) (cm.).
Ω	= Función de transferencia entre la entrada y salida de agua en la cuenca.
$\left. \frac{\partial s}{\partial t} \right _t$	= Valor de la derivada de la variable del modelo en el tiempo t .
Δt	= Paso de tiempo para la integración numérica.
ΔM	= Déficit de humedad del suelo = $(1 - S_e)\theta_e$.

Capítulo 1: Introducción

1.1. Presentación de la Problemática

La modelación hidrológica distribuida de cuencas (MHD) es un área que, si bien cuenta con software específico desde hace varias décadas ([Singh, 1996](#)), ha cobrado interés práctico con el desarrollo de la potencia de cálculo de las computadoras modernas. Su aplicación ha cobrado mayor interés en cuencas de mediana a gran extensión, tanto en la simulación de eventos como en la de los procesos continuos. Los modelos distribuidos de celdas o de grilla se adaptan mejor tanto en el pre como en el postprocesamiento al modelo ráster de información y a los Sistemas de Información Geográfica (GIS, por sus siglas en inglés) que trabajan con él ([Vieux, 2004](#)). Es menor el número de aplicaciones de la MHD a la simulación de procesos hidrológicos en áreas urbanas ([Rodríguez et al, 2008](#); [Amaguchi et al, 2012](#); [Pan et al, 2012](#)), y en este caso casi con exclusividad basadas en el modelo vectorial de información.

En este trabajo se propone utilizar el modelo hidrológico distribuido TREX ([England et al, 2007](#); [Velleux et al, 2008](#)), para la modelación de una cuenca fuertemente alterada por el hombre, ocupada en gran parte por un área urbana. TREX es un modelo hidrológico totalmente distribuido (de celdas), de fuerte base física, orientado a la simulación de eventos, que puede representar los procesos de: retención superficial, interceptación vegetal, infiltración y escurrimiento superficial. Para la simulación del escurrimiento superficial se utiliza un esquema en diferencias finitas y para la integración temporal un esquema tipo Euler. TREX ha demostrado una gran versatilidad en la modelación hidrológica de cuencas del área serrana de la provincia de Córdoba ([Weber et al, 2012](#); [Stehli, 2013](#)) en su uso conjunto con el GIS GRASS ([Neteler y Mitsova, 2008](#)) y el Modelo Digital de Elevación SRTM; aunque la aplicación de este último en la MHD urbana puede presentar algunas limitaciones ([Akbari et al, 2011](#)).

El sistema de estudio propuesto es la cuenca del río Cascavel, en la localidad de Guarapuava, región centro-sur del estado de Paraná, Brasil. Su superficie es de aproximadamente 81 km², y es tributaria del río Jordão, el que a su vez desagua en el río Iguazú. El área urbana de Guarapuava está casi totalmente situada dentro de la cuenca, que de esa forma presenta el 40% de su área urbanizada ([Dias de Oliveira, 2011](#)). Esta cuenca es monitoreada por el Laboratorio de Hidrología (UNICENTRO) disponiendo de datos limnimétricos, pluviométricos y de sedimentos en suspensión en intervalos de 15 minutos.

Resulta de interés el desafío de aplicar este modelo (totalmente distribuido de celdas) a una cuenca fuertemente antropizada, en donde existe una gran área urbanizada, con las consiguientes modificaciones metodológicas necesarias en función de la información disponible y los requerimientos del programa.

Sumado a lo anterior, el contar con un modelo totalmente distribuido calibrado y validado para una cuenca como la del Río Cascavel, en donde son periódicas las

ocurrencias de inundaciones, puede ser utilizado como ayuda para la toma de decisiones para minimizar y reducir estos inconvenientes.

1.2. Objetivos del trabajo

1.2.1. Objetivo General

Implementar y validar una metodología para la modelación distribuida de escurrimiento superficial en áreas urbanas, en base al formato ráster de información.

1.2.2. Objetivos Particulares

- Aplicar el modelo hidrológico distribuido TREX (modelo ráster) a la cuenca del Río Cascavel para simular eventos históricos, calibrando sus parámetros para lograr la mejor representación de la respuesta hidrológica observada.
- Utilizar el modelo SWMM para la modelación de los conductos y canalizaciones y la cuenca del Río Cascavel.
- Validar el modelo calibrado de la cuenca del río Cascavel.

1.3. Contenido de la tesis

El presente documento de tesis se organizó en seis capítulos que se ordenan acorde a la cronología del desarrollo del estudio y de anexos con información complementaria de los distintos capítulos. Los trabajos consultados y citados en el texto de los capítulos se indican en el capítulo "Bibliografía".

Una breve descripción de los contenidos de los diferentes capítulos se realiza en los siguientes párrafos:

CAPÍTULO 1: Introducción.

En este capítulo se exponen los motivos que llevaron a la propuesta del tema de tesis y se plantean los objetivos generales y particulares a alcanzar.

CAPÍTULO 2: Marco teórico.

En este capítulo, se exponen nociones de hidrología y el funcionamiento del ciclo hidrológico. Se realiza una descripción de las características principales de la hidrología urbana que la diferencia de la hidrología rural.

Se realiza una recopilación de diversos modelos hidrológicos distribuidos aplicables a cuencas urbanas.

Se describen detalladamente los modelos a utilizar: TREX y SWMM. Se presenta el cambio realizado en el código fuente de TREX para que este modelo pueda simular elementos de las cuencas urbanas.

Finalmente, se presenta el procedimiento adoptado para realizar la modelación hidrológica distribuida de una cuenca urbana teniendo en cuenta todos sus elementos

particulares utilizando en conjunto al modelo TREX, previamente modificado su código fuente, y el modelo SWMM.

CAPÍTULO 3: Área de estudio.

Se presenta una descripción de las características de la cuenca de estudio, su ubicación, hidrografía, los tipos de suelos presentes, la vegetación típica y el clima. Se hace referencia a otros estudios desarrollados en investigaciones de la Universidad Estatal de Centro-Oeste de Paraná, Brasil (UNICENTRO) en la misma cuenca y se exponen los criterios que justifican la adopción del área para la presente tesis, relacionado principalmente por el desarrollo de la localidad de Guarapuava dentro de la cuenca del Río Cascavel.

CAPÍTULO 4: Metodología del trabajo.

En este capítulo, se presenta en primer lugar la implementación del modelo TREX y SWMM en un área urbana, identificando los requerimientos necesarios para implementar cada modelo en una cuenca urbana.

Luego, se presenta la modificación del código fuente del modelo TREX para que el mismo pueda determinar el caudal insumido de distintos tipos de bocas de tormentas presentes en las cuencas urbanas. Se realiza una validación de las correcciones realizadas en el código fuente simulando ejemplos simples que se encuentran en la bibliografía.

Finalmente en este capítulo, se presenta el procedimiento de implementación de los modelos TREX (con la modificación del código fuente) y SWMM para la modelación de una cuenca urbana de manera completa y con todos sus elementos característicos.

CAPÍTULO 5: Información de Base.

En este capítulo, se presentan todos los datos disponibles recopilados y su procesamiento para la creación de los modelos de cuenca del Río Cascavel tanto en el modelo TREX como en el modelo SWMM.

Con datos de curvas de nivel y mediciones in situ se creó el modelo digital de elevación que fue debidamente procesado y adecuado para poder simular cauces, calles y las barreras que generan los edificios. Este mapa sirve de base para el modelo TREX y para identificar las cotas de fondo de los conductos, cauces y canales en el modelo SWMM.

Se procesaron los datos de tipo y uso de suelo para poder ser utilizados en TREX. Al mapa de tipo de suelo se le agregaron los tipos que representan las bocas de tormenta y los cauces.

Se creó con ayuda de mapas catastrales e hidrográficos la red de conductos y cauces a utilizar para generar el modelo hidráulico en SWMM.

Finalmente, se evaluaron y procesaron los datos de precipitaciones y caudales para poder aplicar los mismos al modelo TREX y luego poder comparar los resultados para la calibración y validación de los modelos.

CAPÍTULO 6: Aplicación y resultados.

En este capítulo, se presentan los eventos que fueron utilizados para realizar la calibración y validación de los modelos TREX y SWMM para la cuenca del Rio Cascavel.

Se indican las variables que fueron ajustadas para realizar la calibración de dichos modelos; en TREX los parámetros que se ajustan para la calibración son: la conductividad hidráulica, altura de succión y porosidad de cada tipo de suelo, la rugosidad (representado por el n de Manning) e intercepción vegetal de cada uso de suelo. Luego, la condición inicial de humedad de la cuenca previa a cada evento (representada en TREX con el déficit de humedad) es variable para cada evento.

En SWMM los parámetros ajustados fueron la rugosidad de los cauces y de los conductos.

Se presentan los resultados del procedimiento de calibración del modelo. Para ello, se evaluaron distintas funciones estadísticas.

Finalmente, se presentan los resultados de la validación del modelo.

CAPÍTULO 7: Conclusiones y productos.

En este capítulo se desarrollan las conclusiones que permitieron dar cumplimiento a los objetivos planteados. Estas conclusiones son en base a los resultados expuestos en el capítulo anterior, pero también en base al desarrollo del trabajo completo, principalmente en el aspecto de la implementación del modelo.

Capítulo 2: Marco teórico

2.1. Nociones de hidrología – ciclo hidrológico

La cuenca hidrográfica ([Aparicio, 1997](#)) se define como una superficie terrestre, en donde las gotas de lluvia caen y son drenadas por un sistema de corrientes hacia un mismo punto de salida.

[Llamas \(1989\)](#) indica que la cuenca es un espacio geográfico que recibe aportes hídricos, esencialmente de las precipitaciones, y que los excedentes que presenta en agua y sólidos transportados por la corriente, toman lugar en una sola desembocadura.

Entre los conceptos básicos de la hidrología, el de ciclo hidrológico puede considerarse fundamental. La continua circulación del agua en el medio natural se ha definido como el ciclo hidrológico. Simplificadamente, el agua pasa a la atmósfera por la evaporación del agua en estado líquido de los océanos y la superficie terrestre ([Chow et al., 1994](#)) (Figura 2-1). Ese vapor de agua es transportado y elevado hasta que se condensa y precipita sobre la superficie terrestre y los océanos. Al precipitar, el agua puede ser interceptada por la vegetación, convertirse en flujo superficial sobre el suelo o infiltrarse en él. Una vez el agua se ha infiltrado, puede circular como flujo subsuperficial y descargar en ríos o alimentar capas más profundas del suelo y recargar el agua subterránea, de donde emerge en manantiales o terminando también en ríos. Por lo tanto, el agua subterránea es un elemento importante del balance hídrico de las cuencas hidrológicas puesto que participa en el ciclo hidrológico como flujo subsuperficial, componente de la escurrentía de los ríos, o flujo de base, y como aguas submarinas subterráneas directas ([Zektser y Loaiciga, 1993](#)). Finalmente, esas corrientes fluyen hacia el mar, contando en todo el proceso hidrológico con un retorno a la atmósfera por evaporación.

Aunque el proceso se ha descrito de manera sucesiva y continua, el movimiento del agua tiene una distribución tanto espacial como temporalmente errática. Esta irregularidad hace tan importante su conocimiento cualitativo y cuantitativo, con las interrelaciones entre los distintos factores para poder predecir el efecto de la actividad humana sobre estas relaciones ([Linsley et al., 1977](#)).

El comportamiento hidrológico viene determinado por patrones climáticos, por la topografía, la geología y la vegetación. Además, la actividad humana va alterando los equilibrios dinámicos alcanzados en el ciclo e inicia nuevos procesos y eventos ([Chow et al., 1994](#)).

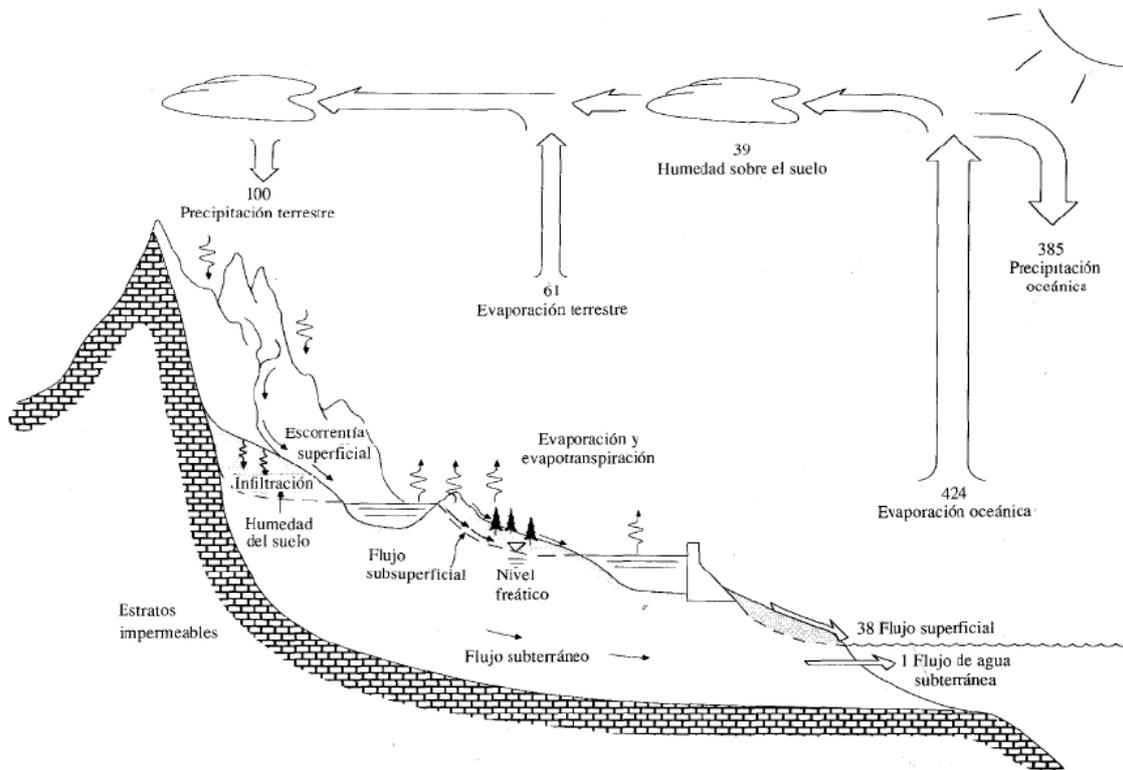


Figura 2-1 - Esquema de los procesos que componen el ciclo hidrológico ([Chow et al., 1994](#)).

2.2. Cuencas antropizadas – hidrología urbana

Debido a las características de la cuenca del Río Cascavel la cual se encuentra fuertemente antropizada y en parte debido a que se encuentra ocupada en un gran sector por la localidad de Guarapuava, se realizan unos breves comentarios sobre los aspectos más importantes respecto a la hidrología urbana.

El rápido crecimiento urbano que se inició en la segunda mitad del siglo XX generó graves déficits de infraestructuras urbanas para el drenaje de las aguas de lluvia, lo que acarrió importantes problemas de inundación en numerosas poblaciones. Todo ello impulsó la aplicación de los conceptos clásicos de la Hidráulica e Hidrología al medio urbano: estudio de la lluvia, de la transformación lluvia-escorrentía y del comportamiento hidráulico del alcantarillado. De este modo hizo su aparición una nueva disciplina: la Hidrología Urbana ([Ripolles y Gómez, 1994](#)).

La urbanización de una cuenca modifica su respuesta hidrológica frente a una determinada lluvia. La urbanización conlleva la alteración de las redes de drenaje natural (construcción de colectores y encauzamientos que aumentan la velocidad del agua hacia aguas abajo de la cuenca) y un incremento de las zonas impermeables en superficie, todo ello con el criterio de drenar lo más eficiente y rápido posible el área urbanizada. Esta dinámica afecta a la hidrología de la cuenca y muy especialmente a las zonas situadas aguas abajo. La urbanización aguas arriba modifica el hidrograma que reciben estas zonas de forma que se incrementan el volumen de escorrentía y el caudal máximo. Asimismo es

MODELACIÓN HIDROLÓGICA-HIDRÁULICA TOTALMENTE DISTRIBUIDA DE UNA CUENCA FUERTEMENTE ANTROPIZADA – CASO DEL RÍO CASCAVEL (GUARAPUAVA/PR, BRASIL)

menor el tiempo que transcurre entre el inicio de la escorrentía provocada por la lluvia y el máximo caudal: disminuye el tiempo de concentración.

Toda cuenca urbana ha sido en algún momento de la historia una cuenca rural, con lo cual puede considerarse a las cuencas urbanas como el efecto de una continua perturbación debido al impacto sobre el medio ambiente natural provocado por los procesos dinámicos de urbanización llevados a cabo por el hombre ([Riccardi, 1997](#)) (Figura 2-2).

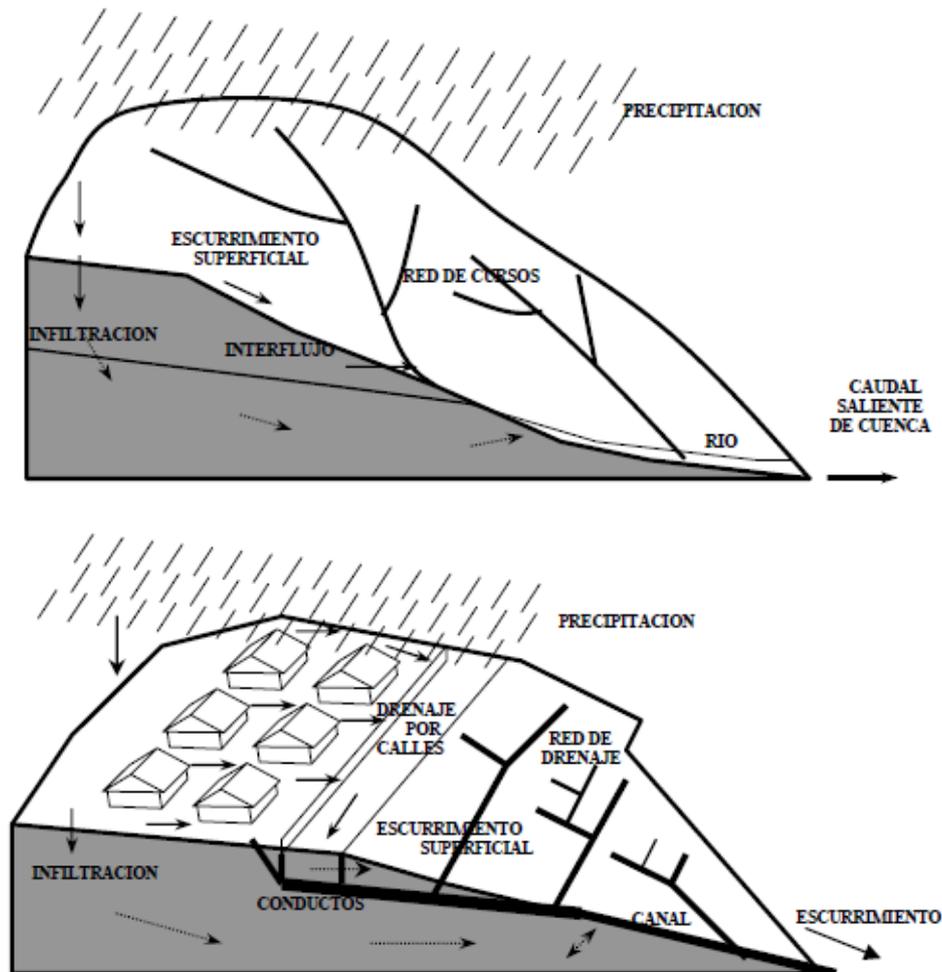


Figura 2-2 - Esquema de procesos hidrológicos en cuenca rural y en una cuenca urbana ([Riccardi, 1997](#)).

El escurrimiento en regiones urbanas por lo general se conforma por dos componentes que si bien están interconectados, su funcionamiento es bien diferenciado. Uno de los componentes es el escurrimiento superficial que ocurre en techos, veredas, parques, calzadas, zanjas, cunetas, áreas impermeables, etc., que puede fluir hacia las obras de captación del sistema de conductos, hacia sistemas de drenajes abiertos (canales urbanos) o fluir directamente hacia el cuerpo receptor. El segundo componente es el que transporta el agua captada del sistema superficial por medio de obras de captación (sumideros, captaciones de zanjas, etc.) denominado sistema de conductos de drenaje (Figura 2-3). Este sistema drena en general hacia el cuerpo receptor, pudiendo presentarse casos de afluencia a sistemas de drenajes abiertos. Los sistemas de conductos

en general se han diseñado con una capacidad de conducción que permita el drenaje del escurrimiento directo de lluvias (en algunos casos crecidas) de 2 a 10 años de período medio de retorno, sin producir anegamiento en el sistema superficial. Para los eventos de recurrencias superiores a la de diseño, la red artificial drenará una parte y será superada, en tanto que la mayor parte del escurrimiento drenará por el sistema superficial (calles y sistemas de drenajes abiertos). Este excedente causará inundaciones y la tendencia del movimiento del flujo será la de escurrir por las antiguas vías naturales, si la topografía no fue sustancialmente modificada. El funcionamiento hidrodinámico del sistema se complejiza puesto que se producen trasvases de cuencas superficiales e interacción continua entre los sistemas mayores y menores, éstos últimos trabajando a presión ([Riccardi, 1997](#)).

Al sistema de conductos se lo denomina sistema menor y al superficial que transporta los excedentes sistema mayor de desagües pluviales.

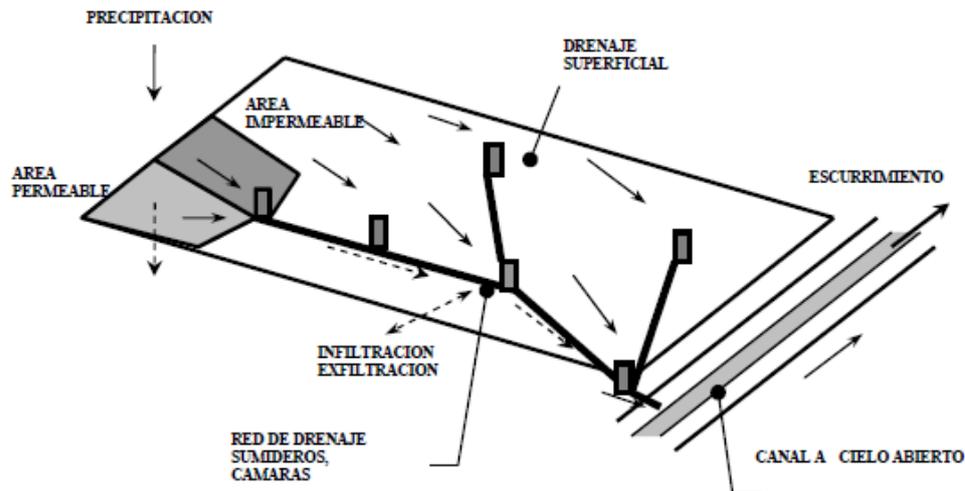


Figura 2-3 - Esquema de componentes en una cuenca urbana ([Riccardi, 1997](#)).

2.3. Estado del arte en las modelación hidrológica distribuida en cuencas urbanas

Para evaluar la respuesta hidrológica de un sistema, regularmente es indispensable la elaboración de algún tipo de esquema, por medio del cual se pueda representar en forma simplificada, un sistema real; en otras palabras: un modelo. El mismo podrá ser utilizado para reconstruir eventos pasados y predecir los futuros ([Puricelli, 2003](#))

El modelo es la representación de algún objeto o sistema, en un lenguaje o forma de fácil acceso y uso, con el objetivo de entenderlo y poder generar sus respuestas para diferentes entradas. Un modelo hidrológico es una herramienta que la ciencia desarrolló para entender mejor y representar el comportamiento de la cuenca hidrográfica y prever condiciones diferentes a las observadas ([Tucci, 1998](#)).

MODELACIÓN HIDROLÓGICA-HIDRÁULICA TOTALMENTE DISTRIBUIDA DE UNA CUENCA FUERTEMENTE ANTROPIZADA – CASO DEL RÍO CASCAVEL (GUARAPUAVA/PR, BRASIL)

En lo que respecta a los modelos hidrológicos, en los años '60 comienzan los desarrollos de los mismos. En 1963 surge el TRRL en Gran Bretaña, el que fuera ampliamente utilizado. En los '70 siguen los avances adquiriendo relevancia el uso de la teoría de onda cinemática para flujos en superficies llanas. En 1972 se publican estudios de efectos de urbanización sobre cuencas. Posteriormente se desarrollan modelos que incluían la simulación de embalses de detención. Se desarrollan modelos como el ILLUDAS (Universidad de Illinois) el HEC-1 (Centro de Ingeniería Hidrológica), el TR55 (Servicio de Conservación de Suelos), STORM (Cuerpo de Ingenieros EEUU). Además surge un poderoso modelo como el SWMM (EPA Agencia norteamericana de protección del Medio Ambiente) que incorpora el módulo de transporte de contaminantes. En Canadá se desarrollan versiones modificadas de los modelos SWMM y HYMO que se denominarían OTTSWMM y OTTHYMO, estos últimos modelaban efectos de urbanización y sistemas de detención y almacenamiento ([Riccardi, 1997](#)).

En Europa fueron desarrollados modelos principalmente para sistema combinados (pluvio-cloacales) poniéndose mayor énfasis en la hidráulica que en la hidrología. Surgen modelos como el WASSP del Consejo Nacional del agua de Gran Bretaña, el WALLRUSS y SPIDA en la Universidad de Wallingford, el CAREDas (Sogreah, Francia), el DAGVL (Suecia), el muy conocido MOUSE en el Instituto de Hidráulica Dinamarques DHI, el MARA (Barcelona, España), etc.

En Argentina se han desarrollado modelos como OCINE-2 (UNL, Santa Fe, Argentina, 1986); ARHYMO (CRA. INCYTH. Argentina, 1994); los que son versiones modificadas del modelo OCINE en el caso del primero y del HYMO10 y OTTHYMO el segundo ([Riccardi, 1997](#)).

Luego, en la sección 2.3.1 se presentan de manera más detallada una recopilación de los modelos existentes y en uso actualmente en áreas urbanas.

Los modelos, se pueden clasificar según la naturaleza de los algoritmos empleados (empíricos, conceptuales o con base física; [Salvadore et al., 2015](#)), o su resolución espacial y cómo representan la complejidad del programa de hidrología urbana.

Los modelos empíricos, están orientados a la observación. Toman solo la información de los datos existentes sin considerar las características y procesos del sistema hidrológico y, por lo tanto, estos modelos también se denominan modelos basados en datos. Implica ecuaciones matemáticas derivadas de series de tiempo de entrada y de salida concurrentes y no de los procesos físicos de la cuenca. Estos modelos utilizan modelos de regresión y correlación y se utilizan para encontrar la relación funcional entre entradas y salidas.

Los modelos conceptuales describen todos los procesos hidrológicos. Consisten en una serie de depósitos interconectados que representan los elementos físicos en una cuenca en la que se recargan por lluvia, infiltración y se vacían por evaporación, escorrentía, drenaje, etc. Se utilizan ecuaciones semi-empíricas en este modelo y los parámetros del mismo son aproximados no solamente con datos estadísticos sino por calibración. Se requiere una gran cantidad de registros meteorológicos e hidrológicos para la calibración.

Los modelos de base física son una representación matemáticamente idealizada del fenómeno real. Utiliza variables de estado que son medibles y son funciones de tiempo y espacio. Los procesos hidrológicos del movimiento del agua están representados por ecuaciones de diferencias finitas. No requiere extensos datos hidrológicos y meteorológicos para su calibración, pero se requiere la evaluación de un gran número de parámetros que describen las características físicas de la cuenca. En este método, se requiere una gran cantidad de datos, como el contenido de humedad del suelo, la profundidad inicial del agua, la topografía, la topología, las dimensiones de la red fluvial, etc. El modelo físico puede superar muchos defectos de los otros dos modelos debido al uso de parámetros con interpretación física.

Los modelos agregados ([Kleidorfer et al., 2009](#)) y semi-distribuidos ([INSA-Valor, 1999](#)) son modelos conceptuales y dependen de una representación simplificada de la heterogeneidad de la cuenca urbana (Figura 2-4). De hecho, toda la cuenca se considera como una sola unidad con características homogéneas para los agregados, mientras que la cuenca se divide en un número limitado de homogéneas subcuencas para los modelos semidistribuidos. Estos dos enfoques fueron ampliamente desarrollados y utilizados porque requieren una cantidad limitada de datos para su implementación, y muestran un tiempo de cálculo rápido. A menudo, en el proceso de calibración, estos modelos de “fuerzan” para representar los datos observados. Sin embargo, estos modelos dan información de salida en la escala de subcuencas, que puede ser una escala muy grande como para cumplir con los requisitos de la gestión de las aguas urbanas para entender algunos problemas de inundación muy local o para evaluar estrategias de manejo a escalas muy pequeñas.

En el trabajo de [Ichiba et al. \(2018\)](#), se recopila la información de otros autores ([Park et al., 2008](#); [Stephenson, 1989](#)) y se indica que parece que la agregación y la desagregación de las subcuencas cambian la salida del modelo, que refleja un “problema de efecto de escala”.

Los modelos hidrológicos totalmente distribuidos son los más complejos porque tienen en cuenta la heterogeneidad espacial en las entradas y los parámetros. Éstos, separan los procesos a simular en elementos pequeños o celdas de cuadrícula (Figura 2-4). También pueden estar estructurados como un modelo basado en la física que los hace más identificables con el proceso hidrológico real. Los modelos espacialmente distribuidos han influido en las prácticas de gestión al proporcionar datos detallados para elementos pequeños ([Sitterson, et al., 2017](#)).

La diferenciación entre modelos semi-distribuidos y totalmente distribuidos teniendo en cuenta solamente la división de la cuenca es relativa, por tal motivo, diversos autores lo diferencian también por el modo de cálculo de los procesos hidrológicos. En el trabajo de [Pina, et al. \(2016\)](#) se realiza una buena caracterización entre los modelos semi-distribuidos (SD) y los totalmente distribuidos (TD).

En primer lugar, se diferencian dependiendo la discretización espacial del módulo de lluvia-escorrentía. Los modelos SD ([Pina, et al., 2016](#)) se basan en la definición de

MODELACIÓN HIDROLÓGICA-HIDRÁULICA TOTALMENTE DISTRIBUIDA DE UNA CUENCA FUERTEMENTE ANTROPIZADA – CASO DEL RÍO CASCAVEL (GUARAPUAVA/PR, BRASIL)

unidades de subcuencas, delineadas en base al análisis de las áreas que drenan hacia un punto de descarga dado. Cada unidad de subcuenca se aproxima mediante una superficie de forma regular a la que se asignan características morfológicas e hidrológicas uniformes (por ejemplo, área, pendiente media, impermeabilidad y propiedades de infiltración). Se asigna una entrada de lluvia espacialmente uniforme a cada subcuenca. Los volúmenes de escorrentía se estiman para la subcuenca y luego se transforman a la salida de la subcuenca por medio de un modelo conceptual o físico. El resultado de este proceso son los hidrogramas de escorrentía en las salidas de las subcuencas.

Los modelos TD se definen mediante una discretización de una malla terrestre 2D. La lluvia se aplica directamente a cada elemento 2D, generando escorrentía en cada celda de la malla, y el traslado de la escorrentía superficial de una celda a otra se simula directamente por el módulo de flujo terrestre 2D. Por lo tanto, los modelos TD están basados físicamente y pueden replicar procesos de escorrentía de manera más realista. Además, debido al tipo de discretización, los modelos TD solo se pueden aplicar con módulos de flujo terrestre 2D.

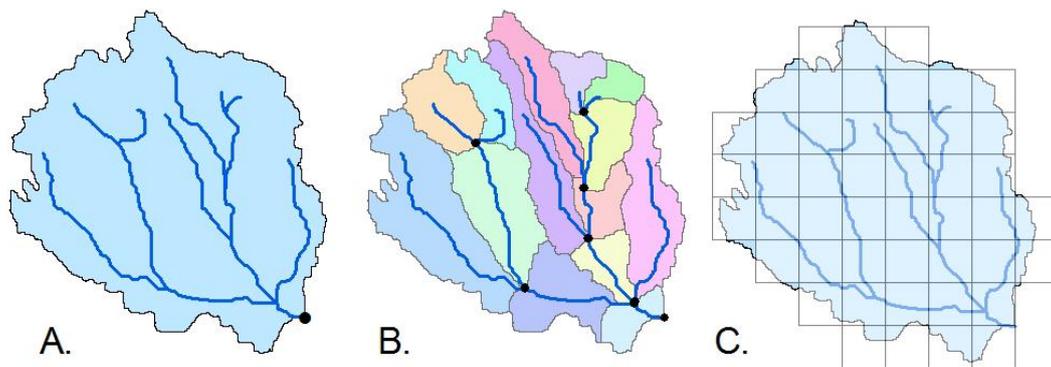


Figura 2-4 - Tipos de modelos hidrológicos según su tratamiento espacial. A: modelo agregado. B: modelo semidistribuido. C: modelo totalmente distribuido ([Sitterson, et al., 2017](#)).

Las principales diferencias entre los modelos SD y TD están relacionadas con el cálculo de las pérdidas de lluvia (pérdidas iniciales y continuas) y la rutina del transporte de la escorrentía. En [Pina, et al. \(2016\)](#) las resumen de la siguiente manera:

Pérdidas iniciales: la principal diferencia está relacionada con la representación del almacenamiento de la depresión. El almacenamiento de la depresión es el agua de la tormenta que se retiene en pequeñas depresiones en la superficie terrestre y en poros de los materiales de la superficie, tanto en áreas impermeables como permeables. En los modelos SD, estos dos fenómenos generalmente se consideran con un valor constante o un valor único que se resta directamente de la lluvia y depende de la pendiente y el tipo de superficie de las subcuencas. En los modelos TD, debido a la resolución más fina, el módulo de flujo terrestre puede dar cuenta de depresiones más detalladas que originan la formación de charcos.

Pérdidas continuas: la principal diferencia está relacionada con el modelado de infiltración. En los modelos SD, la infiltración se estima para cada subcuenca en función de la saturación del suelo, y se resta de la lluvia antes de aplicarse al modelo. En los modelos

TD, la lluvia se aplica directamente a la malla terrestre y se estima la infiltración para cada elemento 2D, en función de la saturación del suelo y la profundidad del agua. Por lo tanto, la infiltración predicha por los modelos TD tiene en cuenta la cantidad de escorrentía en la superficie terrestre y puede simular la infiltración en superficies permeables de escorrentía que llegan desde áreas impermeables aguas arriba.

Rutina de transporte de la escorrentía: en los modelos SD, la escorrentía generada es transformada por el módulo de lluvia-escorrentía en un hidrograma de entrada que generalmente se aplica al módulo de flujo de alcantarillado o a otra subcuenca. En los modelos TD, la escorrentía generada se aplica directamente al módulo de flujo terrestre y se traslada en la superficie terrestre. Las funciones de transformación de escorrentía en los modelos SD se basan tanto en métodos físicos como en métodos empíricos o conceptuales, con resoluciones definidas por los tamaños de las subcuencas. El transporte de la escorrentía en los modelos TD se simula mediante la aplicación de enfoques basados físicamente con resoluciones definidas por la malla definida en la superficie. Mientras que los modelos FD permiten la representación de la conexión real entre las áreas impermeables y permeables en la superficie, los modelos SD generalmente combinan las descargas de escorrentía a las alcantarillas desde el área impermeable y permeable de las subcuencas, a menos que las subcuencas sean permeables o impermeables. Además, los volúmenes de escorrentía capturados por las lagunas o puntos bajos de la superficie son capturados por los modelos TD, ya que consideran la escorrentía en la malla terrestre, mientras que en los modelos SD pueden descuidar estos volúmenes dependiendo de la delineación de subcuencas y su definición de descarga.

En el trabajo ya citado previamente de [Sitterson, et al., 2017](#) también realiza una caracterización y diferenciación de los modelos hidrológicos SD y TD.

Allí indica que los modelos semi-distribuidos son variaciones de modelos agregados, con características de modelos distribuidos. Pueden consistir en una serie de parámetros agrupados aplicados de una manera cuasi espacialmente distribuida. Los modelos semi-distribuidos calculan la escorrentía en el punto de salida para cada subcuenca.

Los modelos semidistribuidos consideran la variabilidad espacial y las características del uso del suelo sin una estructura de modelo abrumadora (Kokkonen et al., 2001, citado por [Sitterson, et al., 2017](#)). Los beneficios de un modelo semi-distribuido son un tiempo de cálculo rápido y la capacidad de usar menos datos y menos parámetros que un modelo distribuido (Pechlivanidis et al., 2011, citado por [Sitterson, et al., 2017](#)). Un inconveniente es la manipulación de datos de entrada. Por ejemplo, los datos de lluvia distribuidos espacialmente deben promediarse dentro de la subárea, o los datos de pluviómetros en ubicaciones específicas deben distribuirse al área utilizando el método del Polígono de Thiessen.

En el mismo trabajo ([Sitterson, et al., 2017](#)), se indica que los modelos completamente distribuidos separan el proceso del modelo por pequeños elementos o celdas de cuadrícula. También están estructurados como un modelo físico que los hace

MODELACIÓN HIDROLÓGICA-HIDRÁULICA TOTALMENTE DISTRIBUIDA DE UNA CUENCA FUERTEMENTE ANTROPIZADA – CASO DEL RÍO CASCAVEL (GUARAPUAVA/PR, BRASIL)

más relacionados con el proceso hidrológico real. Cada elemento pequeño (o célula) tiene una respuesta hidrológica distinta y se calcula por separado, pero incorpora interacciones con células limítrofes. Al calcular la escurrimiento para cada celda de la cuadrícula, el modelo proporciona información de escurrimiento detallada en varios puntos dentro de la cuenca. Los modelos distribuidos transportan la escurrimiento calculada de cada celda a la celda o corriente más cercana, en función de las ecuaciones físicas utilizadas para determinar la trayectoria del flujo y los desfases de tiempo naturales. Los modelos distribuidos son intensivos en datos, con todos los datos de entrada distribuidos espacial y temporalmente.

En resumen las diferencias más grandes que se pueden distinguir entre un modelo semi-distribuido y totalmente distribuido se pueden enumerar de la siguiente manera:

- En los modelos SD la división de la cuenca se da en subcuencas que tienen un punto de descarga definido. En los modelos TD la cuenca se divide en una malla de celdas donde la descarga se da según la topografía y formulaciones que simulan el flujo superficial.
- Los modelos TD tienen la posibilidad de simular la parte de pérdidas iniciales de la precipitación como ser; los almacenamientos superficiales o encharcamientos que se generan producto de la topografía (según el grado de discretización de la malla en que se divide la cuenca). En cambio, en los modelos SD las pérdidas iniciales se indican para cada subcuenca y abarca tanto el almacenamiento en superficie como la interceptación vegetal o en superficies.
- En los modelos TD las celdas pueden recibir los escurrimientos que llegan desde otras celdas y simular la infiltración teniendo en cuenta dicho fenómeno ya que la infiltración se determina teniendo en cuenta también la altura de agua en superficie.
- En los modelos SD la forma de la salida de cada subcuenca se da según una formulación empírica o física determinando un hidrograma a la salida de cada subcuenca. En cambio en los modelos TD la escurrimiento se simula según ecuaciones de base física con resolución dependiendo de la malla adoptada en la superficie.
- Los modelos SD, por lo general, requieren un costo computacional menor a los modelos TD.
- Los modelos TD necesitan además una gran cantidad de datos de alta resolución que los modelos SD.

En este trabajo, se evalúa aplicar un modelo totalmente distribuido de celdas a una cuenca fuertemente urbanizada, se trata de la cuenca del Río Cascavel, la cual tiene una gran área ocupada por la mancha urbana de la localidad de Guarapuava. Por lo tanto, un sector de la cuenca mencionada tiene las características de una cuenca urbana. Existen antecedentes de aplicación de un modelo totalmente distribuido de celdas aplicado en un sector urbano, aunque es más ampliamente difundido la modelación de estas áreas con modelos denominados semi-distribuidos.

A continuación se presentan una recopilación de una serie de modelos denominados semi-distribuidos y totalmente distribuidos aplicados en áreas urbanas.

2.3.1. Modelos existentes

Los modelos que se describen a continuación son utilizados en el ámbito urbano. Los mismos fueron seleccionados a partir de una serie de trabajos que realizaron una recopilación o comparación de modelos hidrológicos utilizados en ámbitos urbanos con distintos objetivos ([Abdullah et al., 2019](#); [Lind, 2015](#); [Rangari et al, 2015](#); [Armitage et al., 2014](#); [Ochoa-Rodriguez et al., 2013](#); [Mitchell et al., 2007](#); [Freni et al, 2003](#)). La información se amplió con recopilación propia y con información de los manuales (cuando se encuentran disponibles) de cada uno de los modelos.

2.3.1.1. SWMM

El programa SWMM (Storm Water Management Model) fue elaborado por la USEPA (U.S. Environmental Protection Agency). Este modelo ha sido especialmente desarrollado para la simulación de sistemas de desagües pluviales y cloacales en forma combinada o separada ([Rossman, 2010](#)).

Este modelo permite interpretar el comportamiento hidrológico de las cuencas de aportes y la respuesta hidrodinámica del sistema de desagüe. Esta es la principal diferencia respecto de los modelos hidrológicos – hidráulicos estándares, los cuales no consideran las perturbaciones de aguas abajo hacia aguas arriba.

SWMM utiliza para el tránsito de los hidrogramas métodos hidrológicos e hidráulicos, estos últimos consideran las ecuaciones de Saint-Venant en su forma completa. La posibilidad de modelar el tránsito hidráulico resulta fundamental en la simulación de desagües donde las condiciones de aguas abajo influyan sobre el escurrimiento en el sistema, como por ejemplo en tramos de baja pendiente o aguas arriba de conductos de escasa capacidad.

SWMM está compuesto por diferentes módulos

- El Módulo Atmosférico, desde la cual se analiza la lluvia caída y los contaminantes depositados sobre la superficie del suelo, que se analiza en el Módulo de Superficie del Suelo. SWMM utiliza el objeto Pluviómetro para representar las entradas de lluvia en el sistema.
- El Módulo de Superficie del Suelo, que se representa a través de uno o más objetos cuenca. Estos objetos reciben la precipitación del Módulo Atmosférico en forma de lluvia o nieve; y generan flujos de salida en forma de infiltración para el Módulo de Aguas Subterráneas y también como escorrentía superficial y cargas de contaminantes para el Módulo de Transporte.

Las cuencas son unidades hidrológicas de terreno cuya topografía y elementos del sistema de drenaje conducen la escorrentía directamente hacia un punto de descarga. El usuario del programa es el encargado de dividir el área de estudio en el número adecuado de cuencas e identificar el punto de salida de cada una de ellas. Los puntos de salida de cada una de las cuencas pueden ser bien nodos del sistema de drenaje o bien otras cuencas.

MODELACIÓN HIDROLÓGICA-HIDRÁULICA TOTALMENTE DISTRIBUIDA DE UNA CUENCA FUERTEMENTE ANTROPIZADA – CASO DEL RÍO CASCAVEL (GUARAPUAVA/PR, BRASIL)

Las cuencas pueden dividirse en subáreas permeables y subáreas impermeables. Las áreas impermeables pueden dividirse a su vez en dos subáreas: una que contiene el almacenamiento en depresión y otra que no lo contempla. El flujo de escorrentía desde una subárea de la cuenca puede fluir hacia otra subárea o por el contrario dos subáreas pueden drenar directamente hacia la salida de la cuenca.

- El Módulo de Aguas Subterráneas recibe la infiltración del Módulo de Superficie del Suelo y transfiere una parte de la misma como flujo de entrada para el Módulo de Transporte. Este módulo permite la simulación utilizando los objetos Acuíferos.

Para este módulo se puede optar entre el módulo de infiltración de Horton, Green & Ampt o el número de curva del SCS.

Cada una de las cuencas se trata como un depósito no lineal. La capacidad de este “depósito” es el valor máximo de un parámetro denominado almacenamiento en depresión, que corresponde con el máximo almacenamiento en superficie debido a la inundación del terreno, el mojado superficial de la superficie del suelo y los caudales interceptados en la escorrentía superficial por las irregularidades del terreno.

La escorrentía superficial por unidad de área, Q , se produce únicamente cuando la profundidad del agua en este “depósito” excede el valor del máximo almacenamiento en depresión, “ d_p ”, en cuyo caso el caudal de salida se obtiene por aplicación de la ecuación de Manning.

- El Módulo de Transporte contiene una red con elementos de transporte (canales, tuberías, bombas y elementos de regulación), unidades de almacenamiento y tratamiento que transportan el agua hacia los Nodos de Vertido o salidas del sistema. Los flujos de entrada de este Módulo pueden provenir de la escorrentía superficial, de la interacción con el flujo subterráneo, de los caudales sanitarios correspondientes a periodos sin lluvia, o de hidrogramas de entrada definidos por el usuario. Los componentes del Módulo de Transporte se modelan con los objetos Nodos y Conducciones.

Las conexiones son nodos del sistema de drenaje donde se conectan diferentes líneas entre sí. Físicamente pueden representar la confluencia de canales superficiales naturales, pozos de registro del sistema de drenaje, o elementos de conexión de tuberías. Los aportes externos de caudal entran en el sistema a través de las conexiones. El exceso de agua en un nudo se traduce en un flujo parcialmente presurizado mientras las conducciones conectadas se encuentren en carga. Este exceso de agua puede perderse completamente del sistema o por el contrario estancarse en la parte superior para posteriormente volver a entrar de nuevo en la conexión.

Los conductos son tuberías o canales por los que se desplaza el agua desde un nudo a otro del sistema de transporte. Es posible seleccionar la sección transversal entre las distintas variedades de geometrías abiertas y cerradas definidas en el programa.

SWMM emplea la ecuación de Manning para establecer la relación entre el caudal que circula por el conducto, la sección del mismo, su radio hidráulico y la pendiente tanto para canales abiertos como para conductos cerrados parcialmente llenos.

Para el caso del Flujo Uniforme y para el caso del Análisis mediante la Onda Cinemática se interpreta como la pendiente de la conducción. En el caso de emplear el Modelo de la Onda Dinámica se interpreta como la pendiente hidráulica del flujo (es decir, la pérdida por unidad de longitud).

2.3.1.2. XPSTORM/XPSWMM

XP Storm y XP SWMM son productos que actualmente se encuentran bajo licencia del grupo de investigación “HR Wallington Software”, igual que Infoworks. Es posible obtener información de los modelos a partir del sitio web de dicho grupo (<https://www.innovyze.com/en-us/products/xpstorm> y <https://www.innovyze.com/en-us/products/xpswmm>).

XPStorm y XPSWMM originalmente fueron desarrollados por XP Solutions de Australia.

SPStorm es un modelo hidráulico e hidrológico integrado utilizado para sistemas de aguas pluviales y fluviales/gestión de llanuras de inundación. Las áreas de uso en relación con el análisis, diseño y planificación de aguas pluviales incluyen, entre otros, el diseño del plan maestro de aguas pluviales, estructuras de bajo impacto de escurrimiento, optimización de estanques de detención, inundaciones urbanas 1D y 2D. El programa tiene integraciones SIG y CAD y puede importar y exportar varios formatos SIG y CAD. Los formatos SWMM 5.0 también se pueden importar y exportar. Los resultados de la simulación pueden presentarse como documentos de resultados, tablas, diagramas de perfil, mapeo de inundaciones y animaciones (Lind, 2015).

Al igual que XP Storm, XPSWMM incluye aguas pluviales y sistemas fluviales / llanuras aluviales. Además, también incluye la gestión de aguas residuales. El modelo simula flujos de red 1D en combinación con flujos terrestres 2D, estructuras LID y calidad de aguas pluviales. La herramienta se puede utilizar para sistemas naturales como, por ejemplo, estanques, ríos y lagos y entornos artificiales como tuberías, conductos y calles.

XPSWMM es una herramienta independiente pero tiene conexiones tanto con CAD como con GIS, lo que permite utilizar una variedad de formatos CAD y GIS. XPSWMM también puede importar y exportar formatos y modelos de datos de SWMM 5.0 y usar el SWMM 5.0 como motor computacional. El resultado se puede presentar de manera similar a los resultados de XP Storm (Lind, 2015).

2.3.1.3. PCSWMM

PCSWMM es una interfaz para SWMM y está desarrollada por Computational Hydraulics Inc. (CHI) (<https://www.pcswmm.com/>). Es un modelo integrado de SIG que utiliza SWMM 5.0 como modelo de motor computacional para los cálculos hidrológicos e hidráulicos. Es una herramienta de modelado independiente con todas las herramientas SIG necesarias incluidas y tiene soporte para varios formatos CAD y GIS (Shamsi, 2005; CHI, 2014b). Los modelos PCSWMM se pueden usar tanto para predicciones continuas a largo plazo como para modelado de eventos únicos. Es un modelo de captación integrada

que incluye alcantarillas pluviales, alcantarillas combinadas, sistemas fluviales, plantas de tratamiento y aguas receptoras. El área de captación se puede dividir en subcuencas y el modelo se puede utilizar para cálculos 1D y 2D ([Lind, 2015](#)).

2.3.1.4. InfoWorks

InfoWorks ofrece un modelado rápido, preciso y estable de los elementos clave de las aguas residuales y sistemas de alcantarillado. Ofrece una completa solución para el problema del modelado de los efectos de remanso y el flujo inverso, canales abiertos, alcantarillas maestras, conexiones de tuberías complejas y estructuras auxiliares.

InfoWorks ofrece visualizaciones interactivas de los datos mediante vistas en planta, cortes, hoja de cálculo y gráficos para los datos variables en el tiempo. El motor de simulación de InfoWorks proporciona un tiempo de ejecución secuencial automática y una solución numérica implícita, para optimizar el tiempo de ejecución y asegurar la estabilidad. Se pueden realizar tanto simulaciones de eventos o continuas.

El modelo global de captación se divide en una serie de sub-cuencas. Cada sub-cuenca puede ser dividida en tipos de superficie. Cada subcuenca contendrá información sobre los diferentes usos del suelo en el área. Cada uso del suelo se clasificará como impermeable o permeable. El modelado de la transformación precipitación-escorrentía está dado por tres procesos simultáneos: pérdidas iniciales (almacenamiento depresión), pérdidas continuas (infiltración) y el enrutamiento de flujo superficial.

Para determinar la cantidad de precipitación que se transforma en escurrimiento y que llega al sistema de drenaje, luego de tener en cuenta las pérdidas iniciales, InfoWorks tiene la opción de utilizar varios modelos: un porcentaje fijo de escurrimiento, el modelo de infiltración de Horton, el modelo de escurrimiento de Wallingford, el número de curva del SCS o el modelo Británico de escurrimiento.

Los conductos son representados como un vínculo/línea en la red, con una longitud definida entre dos nodos. Se define el ingreso y egreso de cada conducto como así también la pendiente (definida por la altura de sus nodos). Pueden modelarse diferentes geometrías y se utilizan para la misma las ecuaciones de Saint-Venant.

Para construir un modelo en Infoworks hay varios datos de entrada necesarios. Los datos de entrada necesarios para la red son propiedades de los conductos, tuberías y pozos de registro como, por ejemplo, longitud, ancho, niveles invertidos y rugosidad. Para la captación, se debe agregar toda el área y el área contribuyente, así como, por ejemplo, varias clases de uso de suelo en cada subcuenca y la conectividad con la red pluvial.

InfoWorks anteriormente llamado HydroWorks, se actualiza constantemente. Es un software con licencia desarrollado por “HR Wallington Software”.

InfoWorks CS-2D es un paquete de software que tiene las mismas funcionalidades que InfoWorks CS, con la diferencia de que la versión 2D incluye un módulo para la simulación 2D del flujo terrestre utilizando una malla triangular. Por lo tanto, InfoWorks CS-2D permite el modelado de drenaje doble 1D-2D, con la interacción entre el alcantarillado y los sistemas de superficie que se producen en pozos de registro y barrancos. Cuando se utiliza InfoWorks CS-2D, es posible aplicar lluvia a través de

subcuencas o directamente en el modelo 2D de la superficie. Sin embargo, este paquete de software no permite el modelado de lluvia-escorrentía cuando la lluvia se aplica directamente en el modelo 2D de la superficie. Para sortear este problema, el modelista debe calcular la escorrentía externamente y restarla del hietograma de lluvia antes de aplicarlo al modelo. Este problema se ha resuelto en el nuevo paquete de software InfoWorks ICM (Integrated Catchment Modeling), que constituye una actualización sobre InfoWorks CS y, entre otras mejoras, permite la estimación de la escorrentía cuando la lluvia se aplica directamente en el modelo 2D de la superficie ([Ochoa-Rodriguez et al., 2013](#)).

Se puede encontrar información sobre este paquete de software en el sitio web de Innovyze (<http://www.innovyze.com/>).

2.3.1.5. Mike Urban.

MIKE Urban es un paquete de software desarrollado por DHI y basado en SWMM 5.0. Es una herramienta de modelado completa integrada con SIG desarrollada por el grupo DHI, organización independiente de investigación y consultoría. El software MIKE URBAN se puede utilizar para sistemas de aguas pluviales y residuales, alcantarillas combinadas y separadas, así como sistemas de distribución de agua.

MIKE URBAN es un software de módulos. El Model Manager es el módulo principal de MIKE URBAN e incluye un módulo de datos común para los sistemas de distribución y recolección de agua. Es posible cargar archivos de SWMM5 y EPANET y archivos de resultados de cualquier tamaño. El motor SWMM5 se incluye para el modelado de aguas pluviales y alcantarillado, mientras que EPANET se incluye para el modelado de distribución de agua. El sistema de recolección consta de varios módulos adicionales como CS-Pipeflow, CSRainfall Runoff, CS- Pollutant Transport, CS- Control y CS- procesos biológicos. Para el módulo adicional CS-Pipeflow se utiliza el motor computacional MOUSE (Modelado de alcantarillas urbanas).

MODELACIÓN HIDROLÓGICA-HIDRÁULICA TOTALMENTE DISTRIBUIDA DE UNA CUENCA FUERTEMENTE ANTROPIZADA – CASO DEL RÍO CASCAVEL (GUARAPUAVA/PR, BRASIL)

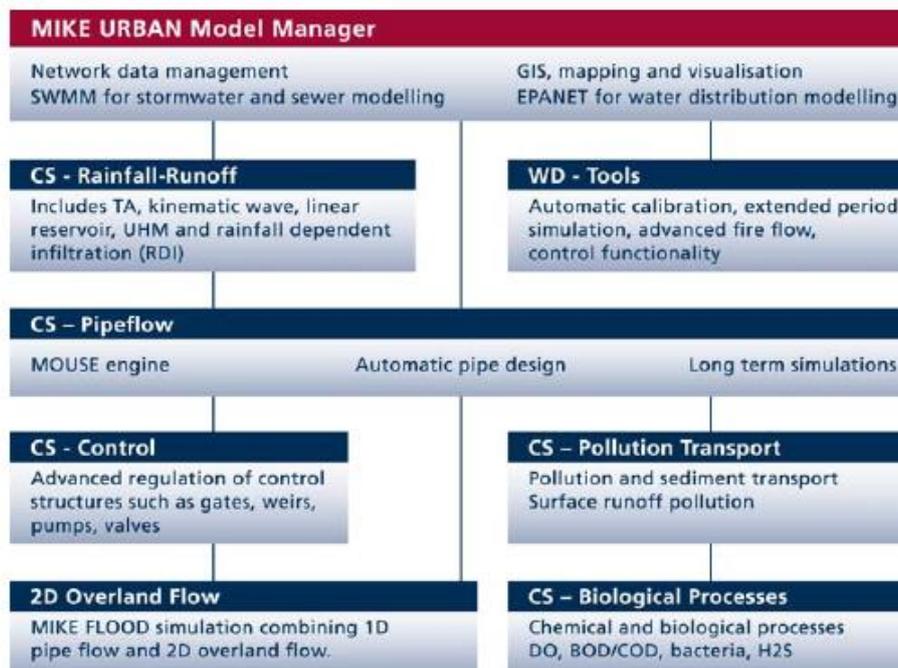


Figura 2-5 – Estructura modular de Mike Urban (DHI, 2017).

Con el paquete completo de software MIKE URBAN, el modelo puede usarse, por ejemplo, para cálculos de cantidad y calidad del agua, simulación de flujo de tubería 1D y flujo terrestre 2D. Los resultados pueden presentarse como visualizaciones 1D, 2D y 3D, series temporales, perfiles, mapas y animaciones.

El costo de MIKE Urban y otros productos DHI depende de la escala espacial y del detalle de las capacidades de modelado requeridas.

En el sitio web del software (<https://www.mikepoweredbydhi.com/>) está disponible el manual, tutorial y demás información del modelo

Otros productos en el conjunto de modelos hidrológicos MIKE incluyen MIKE SHE y MIKE FLOOD.

2.3.1.6. HIDRAS

Mobayed y Cruickshank (1998), Mobayed y Ortiz (2000) y Mobayed (2009) desarrollaron el modelo hidrológico distribuido HIDRAS, el cual integra bajo una misma plataforma el procesamiento de la información digital climatológica, hidrométrica, fisiográfica y topográfica para la estimación de parámetros hidrológicos y tiene implementados algoritmos de cálculo de las diferentes etapas del proceso lluvia-escorrimento.

El modelo hidrológico distribuido HIDRAS usa la información de los modelos digitales de elevación (MDE), no sólo para definir direcciones de flujo y la acumulación de elementos para configurar la red de drenaje, sino también para hacer el escalado de la cuenca en celdas geomorfológicas, esto es una agrupación mínima y suficiente de

elementos que dan forma a una superficie tributaria. Tal agrupación corresponde al área mínima capaz de formar un cauce incipiente de escurrimiento.

Para la escorrentía pluvial, cada unidad produce un hidrograma incipiente o propio, equivalente a la precipitación en exceso de cada unidad. El tránsito de avenidas por los cauces se basa en una forma integral de la ecuación dinámica de advección-difusión que corresponde a una simplificación de las ecuaciones de Saint-Venant para flujo 1D transitorio a superficie libre. Dado que la forma y el tamaño de una celda geomorfológica pueden modificar el hidrograma definido solo en función de la lluvia en exceso, se usa un esquema de convolución para caracterizar el efecto regulatorio del área tributaria. Y para valorar el efecto que producen las áreas de inundación, se toma en cuenta el cambio que experimentan los coeficientes de celeridad y difusión cuando la escorrentía ocurre en la sección modificada del área (planicie) de inundación. Los hidrogramas que producen un tránsito de avenidas sin efecto de regulación sirven como elemento de referencia para cuantificar los volúmenes de retención y retorno a los cauces, por comparación con los hidrogramas regulados para estimar la retención global y la asociada a cada elemento de la red de drenaje.

2.3.1.7. Casc-2d-TREX

El punto de partida para el desarrollo de TREX (Two-dimensional Runoff, Erosion, and eXport model) fue el modelo hidrológico CASC2D (CASCade of planes, 2-Dimensional). La estructura básica es un modelo basado en eventos que simula el flujo superficial, la erosión de la superficie del suelo y la deposición, flujo en canal y transporte de sedimentos a través de los cauces fluviales ([England et al., 2007](#)). Como parte del desarrollo de TREX, los componentes hidrológicos y de transporte de sedimentos de CASC2D se ampliaron de manera significativa y mejoraron para soportar el modelado de las inundaciones y las características químicas de transporte ([Velleux et al., 2008](#)).

El ciclo hidrológico en TREX comienza con la precipitación (pluvial y/o nival), una fracción de la misma quedará retenida en la vegetación, luego la precipitación excedente está disponible para infiltrar o escurrir superficialmente. En este modelo se utiliza la relación de Green y Ampt para definir la infiltración en la superficie del terreno y en los cauces. Si la tasa de precipitación supera la capacidad de infiltración, el agua se almacena en las depresiones del terreno hasta un determinado umbral que da comienzo al flujo superficial. Este flujo está gobernado por las leyes de conservación de la masa y de la cantidad de movimiento. TREX utiliza la aproximación de la onda difusiva unidimensional en cauces y bidimensional en la superficie de la cuenca, suponiendo que el flujo es turbulento y que la resistencia al flujo se puede describir utilizando la formulación de Manning ([Iorquera et al., 2012](#)).

CASC2D y TREX fueron pensados originalmente para cuencas rurales pero se encuentran varios trabajos en los cuales se aplican en cuencas urbanas con aceptables resultados. El inconveniente se presenta principalmente porque no modela los flujos en tuberías.

TREX y CASC2D son modelos de dominio público desarrollados por la Universidad Estatal de Colorado ubicada en Fort Collins (Colorado State University-Fort Collins), Estados Unidos.

2.3.1.8. Multi-Hydro

Multi-Hydro, es un modelo totalmente distribuido, que se está desarrollando actualmente en la Ecole des Ponts ParisTech. Presenta varios componentes que interactúan entre sí para simular los distintos procesos hidrológicos e hidráulicos que intervienen en una cuenca periurbana. Cada componente se basa en modelos existentes y ampliamente validados, y que son software de dominio público. Los procesos modelados son las precipitaciones, la escorrentía, la infiltración en suelos heterogéneos, y el drenaje en los sistemas de alcantarillado ([Giangola-Murzyn, 2013](#)).

El modelado de los procesos de superficie está realizado por TREX (citado anteriormente). Con este modelo se realiza la simulación de los procesos superficiales: precipitación, intercepción, almacenamiento, infiltración y escorrentía superficial.

El modelado del flujo en zona no saturada se realiza con el software VS2DT ([Healy, 1990](#)). Este modelo permite simular el flujo y transporte en medios porosos variablemente en una y dos dimensiones. El modelo VS2DT es un modelo de diferencias finitas que resuelve la ecuación de Richards para el flujo y la ecuación de advección-dispersión para el transporte de solutos.

Por último para la simulación de las redes de saneamiento se utiliza el modelo SWMM (también ya descrito anteriormente).

Multi-Hydro posee una interfaz gráfica para la preparación e importación de datos de modelación. El modelo se encuentra en desarrollo y todavía no es posible la obtención del mismo y de un manual en la web.

2.3.1.9. Itzi

El modelo Itzi es el trabajo del proyecto de Doctorado de Laurent Courty bajo la supervisión del Dr. Adrián Pedrozo-Acuña, de la Universidad Autónoma de México. Dicho proyecto se encuentra en desarrollo y es posible encontrar los avances del mismo, como así también tutoriales, ayudas, aplicaciones, etc. en la página web del proyecto: <https://www.itzi.org/>.

Itzi es un modelo hidrológico dinámico, completamente distribuido que simula los flujos 2D de la superficie regular con la ayuda de mapa raster y el flujo en la red de drenaje a través del modelo SWMM.

El modelo Itzi, resuelve las ecuaciones de inercia parcial amortiguada, está escrito en lenguaje Python y es compatible con plataformas de Sistemas de Información Geográfica de libre distribución (por ejemplo GRASS) ([Courty et al, 2017](#)).

Itzi integra el modelo SWMM con un modelo inercial de superficie. Las interacciones entre el modelo de superficie y la red de drenaje se realizan en el nodo de la red a través de las ecuaciones de orificio, según el tirante de agua en cada modelo. Los dos

modelos se ejecutan simultáneamente y el intercambio entre los dos son bidireccionales. El agua puede entrar o salir de la red de drenaje.

El modelo presentado resuelve las ecuaciones de aguas someras de forma simplificada, a través del método de diferencias finitas. El cálculo de flujo está compuesto por ecuaciones cuasi-bidimensionales, que resuelven de manera independiente el flujo en cada dimensión ([Courty et al, 2017](#)).

2.3.1.10. STORMCAD

StormCAD es un producto de Bentley (<https://www.bentley.com/es/products/product-line/hydraulics-and-hydrology-software/stormcad>) y es una herramienta utilizada para diseñar y analizar sistemas de alcantarillado de aguas pluviales. StormCAD utiliza el método racional para calcular los flujos máximos y no tiene en cuenta las estructuras de detención y los cambios de flujo a lo largo del tiempo ([Lind, 2015](#)).

2.3.1.11. CIVILSTORM

Otro producto de Bentley es CivilStorm (<https://www.bentley.com/es/products/product-line/hydraulics-and-hydrology-software/civilstorm>). Es un software de modelado de aguas pluviales que modela más aspectos del sistema que StormCAD. CivilStorm es un modelo dinámico que tiene en cuenta el almacenamiento, la detención y los flujos a lo largo del tiempo y, por lo tanto, es una herramienta de modelado más avanzada que StormCAD. Se utiliza para la planificación maestra y estudiar la calidad del agua. Puede, como StormCAD, usarse como un producto independiente pero también dentro de AutoCAD y otras herramientas de software. El usuario puede optar por utilizar el motor SWMM o la solución incorporada CivilStorms. Los resultados se pueden presentar como, por ejemplo, mapeo temático, gráficos dinámicos, perfiles y tablas ([Lind, 2015](#)).

2.3.1.12. SEWSYS

SEWSYS es un modelo informático desarrollado en el programa de computación matemática MATLAB/Simulink dentro de un proyecto de doctorado para el programa de investigación Urban Water. SEWSYS es un modelo de flujo de sustancias que se puede utilizar para evaluar y simular el flujo de 20 contaminantes de aguas pluviales diferentes. Otra aplicación del modelo es evaluar diversas acciones para reducir la contaminación. El modelo explica tanto la contaminación de aguas pluviales como las de aguas residuales. También es posible definir las fuentes de contaminantes dentro del área de captación. Se requieren MATLAB / Simulink para ejecutar el modelo y los resultados se pueden usar en MATLAB o exportar a Microsoft Excel u otros programas similares. Los resultados pueden presentarse como hidrogramas, cantidades totales de contaminantes y cantidades de contaminación por año. ([Ahlman, 2006](#), citado por [Lind, 2015](#)).

2.3.1.13. MUSIC

El Modelo para la conceptualización de la mejora de las aguas pluviales urbanas (MUSIC) es una herramienta de evaluación de la calidad de las aguas pluviales desarrollada por la empresa australiana de gestión del agua, eWater. El modelo se utiliza para analizar los diseños conceptuales de la infraestructura de aguas pluviales y pone un énfasis particular en los objetivos de calidad del agua ([Elliott y Trowsdale, 2007](#), citado en [Armitage et al., 2014](#)). MUSIC modela el control del flujo aguas abajo y los beneficios de calidad del agua logrados a través de la instalación de mejores prácticas de gestión (BMP) estructurales ([Lloyd et al., 2002](#), citado en [Armitage et al., 2014](#)). Desarrollado por primera vez en 2001, el software está diseñado para ayudar a los profesionales urbanos de aguas pluviales a crear y visualizar estrategias para abordar los problemas asociados con la hidrología de las aguas pluviales y los impactos de la contaminación.

MUSIC puede operar en un rango de escalas espaciales y temporales; Puede simular cuencas de 0.01 a 100 km² con pasos de tiempo que van desde 6 minutos a 24 horas. Las operaciones básicas del modelo de software incluyen ([Lloyd et al., 2002](#), citado en [Armitage et al., 2014](#)):

- Determinar la probable calidad del agua que se libera de las cuencas urbanas.
- Predecir el rendimiento de BMP estructurales en la protección de la calidad del agua.
- Diseño de un sistema integrado de gestión de aguas pluviales.
- Evaluar el éxito de los diseños potenciales contra una gama de estándares de calidad del agua.

La última versión de MUSIC, es decir, MUSIC 6.3 se lanzó en Noviembre de 2017, es posible su descarga en la página web australiana de eWater (<https://ewater.org.au/products/music/>).

2.3.1.14. SOBEK-URBAN.

Sobek fue desarrollado por la compañía holandesa Deltares y, como tal, es el software más utilizado en los Países Bajos.

Sobek es un paquete comercial para modelar procesos hidrológicos e hidráulicos tanto en áreas rurales como urbanas. Comprende una serie de módulos para aplicaciones específicas; uno de ellos es Sobek-Urban, que puede usarse para modelar sistemas de drenaje urbano e inundaciones pluviales urbanas. Sobek-Urban ofrece capacidades de modelado 1D y 2D. Al igual que InfoWorks CS, Sobek-Urban-1D es un paquete de modelado semi-distribuido, con precipitaciones aplicadas al modelo a través de subcuencas, cada una de las cuales puede comprender diferentes tipos de superficie con diferentes parámetros de escorrentía ([Ochoa-Rodríguez et al., 2013](#)).

Este módulo utiliza las ecuaciones completas de Saint Venant, por lo que incluye fenómenos de refluo y flujo transitorio. Modela una amplia variedad de secciones transversales y formas de registro (incluidas las definidas por el usuario) y le permite crear su propia base de datos de sección transversal y registro. Está especialmente

diseñado para manejar redes de alcantarillado grandes y complejas en una PC ordinaria, donde el tiempo de cálculo es solo lineal con el tamaño de la red e independiente de su complejidad. El motor de simulación hidrodinámica 1D / 2D tiene un procedimiento automático de secado y presurizado y maneja el flujo supercrítico real y siempre es 100% conservador de masa.

Se puede especificar prácticamente cualquier tipo de estructura hidráulica, como bombas de una o varias etapas, vertederos de cualquier forma, compuertas rectangulares y circulares, alcantarillas y cuencas. Todas las estructuras manejan condiciones de flujo libre, sumergido y transitorio.

En Sobek-Urban-1D, los flujos de clima seco y la transformación en tiempo de lluvia en escorrentía que ingresa al sistema de alcantarillado se simulan en base al modelo NWRW (Nationale Werkgroep Riolerling en Waterkwaliteit). Los procesos incluidos en este modelo son: almacenamiento en superficie, evaporación, infiltración (solo para áreas impermeables permeables o abiertas) y retraso de la escorrentía. El almacenamiento en la superficie se produce como resultado de la humectación y la formación de charcos y su profundidad máxima se especifica como un valor fijo (en mm). La evaporación y la infiltración reducirán el almacenamiento en la superficie. Cuando el volumen de lluvia excede el almacenamiento en superficie, se produce la escorrentía hacia el sistema de alcantarillado. El retraso en la escorrentía (es decir, la ruta de concentración de escorrentía) se describe mediante el Método racional de demora de escorrentía, que incorpora un coeficiente de demora de escorrentía cuyo valor depende de la distancia promedio a la ubicación de entrada en el sistema de alcantarillado, la pendiente y la rugosidad del área. Se pueden asignar diferentes coeficientes de retraso de escorrentía a diferentes áreas. En Sobek-Urban-1D, el flujo en las alcantarillas se simula utilizando la aproximación de onda dinámica de las ecuaciones de Saint-Venant. Alternativamente, en Sobek-Urban-1D también es posible modelar la superficie urbana en 1 dimensión y acoplarla con el modelo 1D del sistema de alcantarillado.

Además, el módulo Sobek-Urban-2D ofrece la posibilidad de implementar un modelo 2D de la superficie que se puede vincular con el modelo 1D del sistema de alcantarillado, lo que resulta en un modelo de drenaje doble 1D-2D. Sobek-Urban-2D simula el flujo terrestre utilizando una cuadrícula rectangular (que permite cuadrículas anidadas de menor resolución). Se basa en las ecuaciones completas de Saint Venant. Cuando se implementa un modelo 2D de la superficie en Sobek, es posible aplicar la lluvia al modelo a través de subcuencas o directamente en la superficie. Sin embargo, de manera similar a InfoWorks CS-2D, Sobek-Urban-2D no permite el modelado de lluvia-escorrentía (es decir, estimación de escorrentía) cuando la lluvia se aplica directamente sobre el modelo 2D de la superficie.

SOBEK-Urban ofrece una herramienta de modelado integral para sistemas de drenaje urbano simples o extensos que consisten en alcantarillas y canales abiertos.

La pantalla gráfica superpone la red sobre un mapa (GIS o fotografía aérea) del área. Las opciones de animación muestran la dirección del flujo y, al variar el grosor y los

colores de los elementos de la red, se pueden visualizar todos los parámetros de entrada y calculados. La red también se puede ver desde un lado y le permite imprimir el diseño y ver el proceso de llenado y secado en detalle

Se puede encontrar más información sobre este paquete de software en <https://www.deltares.nl/en/software/module/sobek-1dflow-urban/>.

2.3.1.15. CANOE

Canoe es un paquete de software comercial dedicado a la hidrología urbana de uso común en Francia. Es el resultado de un convenio entre dos de los softwares franceses más utilizados en ese país en el campo de la hidrología urbana: CEDRE, desarrollado por el laboratorio URG-C-Urban Hydrology de INSA Lyon y CAREDAS, desarrollado por SOGREAH.

Es un paquete de modelado semi-distribuido, similar a InfoWorks CS. Al igual que en InfoWorks CS, las subcuencas pueden comprender diferentes tipos de superficie, cada uno de los cuales tiene diferentes parámetros de escorrentía y tiempos de respuesta. En Canoe, el flujo en el sistema de alcantarillado se modela con la ayuda de una aproximación numérica de la forma más completa de las ecuaciones de Saint-Venant (es decir, enfoque de onda dinámica). Canoe no permite el modelado 2D de la superficie urbana; sin embargo, permite el modelado 1D de la superficie. Se puede encontrar más detalles sobre este paquete de software en el manual del usuario ([Allison et al., 2005](#), citado en [Ochoa-Rodriguez et al., 2013](#)).

2.1.1. Elección de modelo a utilizar.

A partir de la recopilación presentada anteriormente se puede observar lo siguiente:

- Existe una gran variedad de modelos hidrológicos aplicados a áreas urbanas principalmente orientados al cálculo de la red de drenaje/conductos pluviales.
- SWMM se presenta como el modelo hidrológico-hidráulico disponible gratuitamente más completo para el ámbito urbano. Por el mismo motivo, es utilizado en varios modelos con licencia paga.
- Si se tiene en cuenta modelos totalmente distribuidos disponibles gratuitamente para aplicar al área urbana se podría mencionar actualmente al modelo Itzi, sin embargo, al comenzar con el trabajo actual (año 2014) no estaba disponible dicho proyecto. Por otro lado, el modelo Multihydro que combina el modelo TREX con SWMM aún a la fecha de escritura de la tesis no se encuentra disponible libremente para su aplicación.

Por dichos motivos, se procedió a utilizar de manera combinada el modelo TREX para modelar la transformación lluvia-escurrimiento y el flujo del escurrimiento superficial y el modelo SWMM para modelar la red de drenaje pluvial.

2.1.2. Estrategias e inconvenientes en la modelación hidrológica distribuida en áreas urbanas

En esta sección, la intención es presentar una serie de características, estrategias e inconvenientes para la realización de modelaciones hidrológicas totalmente distribuidas en áreas urbanas, principalmente como representar y modelar los elementos característicos de un área urbana como ser: parcelas, calles, veredas, edificios, terraplenes, bocas de tormenta, etc.

La definición adecuada de las propiedades geométricas de la captación es muy importante para estudiar el fenómeno de la escorrentía en las cuencas urbanas. Las bases de datos urbanas permiten representar una cuenca urbana como un conjunto de superficies elementales conectadas a una red, cuya finalidad es conducir el caudal hasta el punto de salida. Las bases de datos permiten la delimitación morfológica de las superficies urbanas: parcelas y calles ([Ojeda y Nicolás, 2011](#)).

El mapa catastral urbano se refiere a los principales elementos geográficos necesarios para describir las cuencas urbanas. Los elementos a identificar son los siguientes ([Berthier et al, 2004](#)):

1. Parcelas, casas, calles, vegetación y las secciones correspondientes.
2. La topografía de cada uno de los elementos de hidrología urbana.
3. La existencia de posibles cuencas naturales que afecten a la zona de estudio.

A partir del análisis de la bibliografía mencionada en las secciones anteriores, los inconvenientes principales que se presentan en la modelación hidrológica en áreas urbanas son las siguientes:

- Relación entre el escurrimiento superficial y la red de drenaje pluvial (conductos).
- Procesamiento del modelo digital de elevación para simular los elementos característicos de las cuencas urbanas, como ser: calles, techos, barreras, terraplenes, etc.
- Elección de la resolución de la malla de los modelos distribuidos.

[Ichiba \(2016\)](#) analiza diversos inconvenientes encontrados en la modelación totalmente distribuida en áreas urbanas que se enumeran a continuación. En primer lugar, en el trabajo mencionado se indica que el efecto de la escala sigue siendo un problema grave en la hidrología urbana, especialmente para los modelos basados en cuadrículas y totalmente distribuidos. La elección de una resolución espacial apropiada es un problema crucial, y el rendimiento del modelo obtenido depende en gran medida de la escala de implementación elegida. La resolución espacial apropiada está obviamente vinculada a la calidad de los datos disponibles, su resolución espacial y el objetivo de modelado ([Dehotin y Braud, 2008](#)). Seguidamente [Ichiba \(2016\)](#) indica que la dependencia de escala observada en las áreas urbanas se debe en primer lugar a la alta heterogeneidad observada en dichas áreas, los efectos de escalado son mucho más importantes en las

MODELACIÓN HIDROLÓGICA-HIDRÁULICA TOTALMENTE DISTRIBUIDA DE UNA CUENCA FUERTEMENTE ANTROPIZADA – CASO DEL RÍO CASCAVEL (GUARAPUAVA/PR, BRASIL)

áreas urbanas que en las rurales. Son las consecuencias de la alta heterogeneidad observada en todos factores geofísicos como la topografía y el uso de la tierra. Los modelos totalmente distribuidos y basados en la física se basan principalmente en una consideración completa de la heterogeneidad de la cuenca. Dichos modelos muestran más flexibilidad para cambiar la escala de implementación, según la disponibilidad de los datos y su calidad.

En el trabajo mencionado [Ichiba \(2016\)](#), donde se utiliza el modelo Multi-Hydro en una cuenca urbana en Francia, con respecto al tamaño de las celdas (Figura 2-6) se concluyó con lo siguiente:

- Tamaños de celdas grandes [100 m - 40 m]: el coeficiente de impermeabilidad de la captación es muy alto, oscila entre el 45% a 100 m y el 30% a 40 m. El flujo del modelo obtenido en este rango de escala exhibe una dinámica similar al flujo observado. Sin embargo, los indicadores de desempeño muestran desempeños muy débiles del modelo en este rango de escala; los indicadores de ajuste indican que el modelo está sobreestimando el flujo observado.
- A escalas medianas [30 m - 15 m]: el modelo muestra sus mejores rendimientos.
- A escalas pequeñas [10 m - 5 m]: los rendimientos del modelo no son claros, incluso si no varían demasiado, se modifican las tendencias observadas en las escalas grandes y medianas.

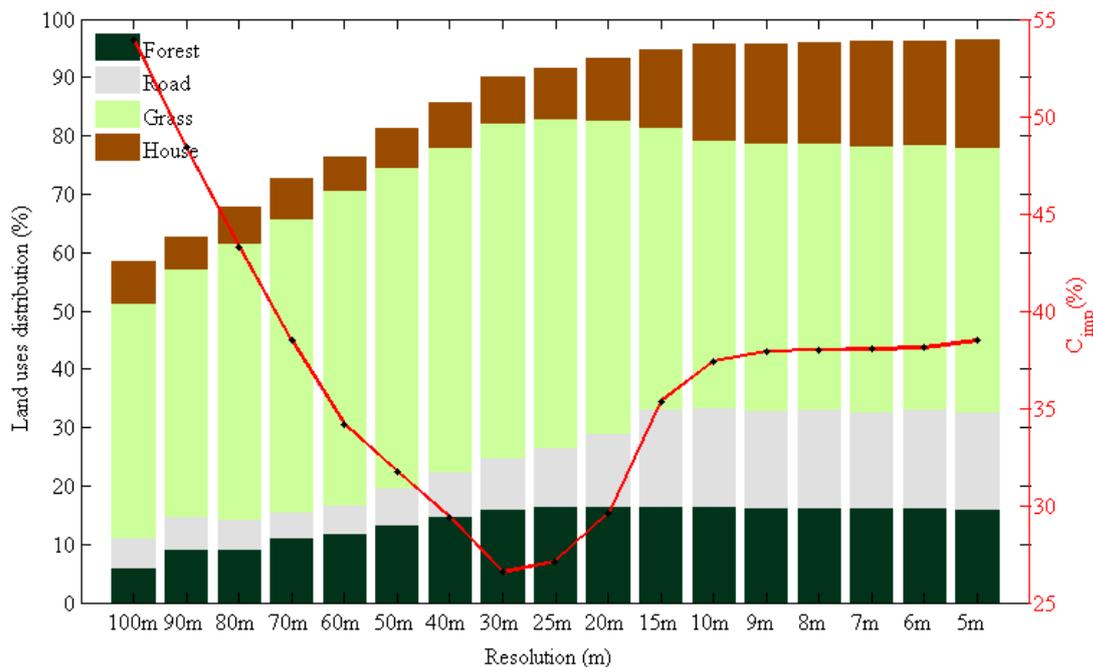


Figura 2-6 - Variación del coeficiente de impermeabilidad en un modelo totalmente distribuido de una cuenca urbana en función de la resolución utilizada ([Ichiba, 2016](#)).

Sin embargo, los rendimientos de los modelos en este rango de escalas no están claros y se notan algunas fluctuaciones de estos rendimientos. Dichas fluctuaciones están de hecho relacionadas con algunos graves problemas que sólo se producen a pequeña escala y deben tenerse en cuenta al implementar modelos de tormentas urbanas:

- Calidad de datos SIG: los modelos hidrológicos urbanos en general y los totalmente distribuidos en particular son muy exigentes en cuanto a los datos distribuidos para su implementación. Una descripción detallada de la ocupación del uso de la tierra es esencial, así como los datos topográficos distribuidos. Dichos datos generalmente están disponibles y pueden ser proporcionados por los servicios SIG. Sin embargo, su calidad es un gran problema, especialmente cuando se utiliza para realizar modelado de alta resolución. Dos cuestiones principales deben detallarse aquí:
 - La resolución espacial de los datos topográficos: la topografía es la principal fuerza motriz para los movimientos del agua superficial y la precisión de estos datos tiene una gran influencia en los resultados de modelos basados en cuadrículas. En el estudio ([Ichiba, 2016](#)), los datos topográficos estaban disponibles con una resolución de 25 m y se realizó una interpolación para obtener datos distribuidos a pequeña escala. Sin embargo, la calidad de los datos obtenidos debajo de la cuadrícula de 25 m no es completamente confiable.
 - Descripción de la ocupación del uso de del suelo: la descripción del uso del suelo también es de extrema importancia en la hidrología urbana y específicamente para los modelos completamente distribuidos. De hecho, las propiedades físicas definidas para cada píxel dependen exclusivamente de su uso de la tierra. Estos datos suelen estar disponibles, especialmente después de las grandes mejoras observadas en la disponibilidad de imágenes de satélite y las nuevas tecnologías utilizadas en este campo. Sin embargo, uno de los problemas frecuentes y recurrentes de estos datos es la porción de datos desconocidos, que indica una ocupación no identificada del uso de la tierra. Esto no está relacionado con la resolución de datos, sino que depende del procesamiento de las imágenes de satélite obtenidas. Para el caso de la cuenca de estudio del trabajo ([Ichiba, 2016](#)), los datos de ocupación del uso de la tierra estaban disponibles a muy buena resolución (25 cm), pero la porción de datos no identificados era de aproximadamente 20% y en la mayoría de los casos se rellenó con pasto. A gran escala, el problema específico de los píxeles "sin datos" no tiene influencia porque el tamaño de los píxeles grandes generalmente incluye una parte de una carretera, una casa, etc. Pero a pequeña escala, el comportamiento de la zona de captación se verá afectado por el uso de la tierra atribuido a estos píxeles sin datos, y la respuesta del modelo no será la lo misma si las áreas no identificadas se llenaron con vegetación o con suelo impermeable. La fluctuación de los rendimientos del modelo observado a escalas muy pequeñas puede de hecho estar relacionada con estas dos cuestiones que, por lo tanto, deben considerarse al implementar modelos hidrológicos.
- Inestabilidades numéricas: la fluctuación del rendimiento del modelo notado a escalas pequeñas también puede ser la consecuencia de inestabilidades numéricas. De hecho, el esquema numérico utilizado en el modelo Multi-Hydro para los

cálculos de modelado de superficie es sensible a la variación a pequeña escala y tiene un efecto en la respuesta del modelo. Se deben realizar más trabajos para cuantificar estas inestabilidades.

- Tiempo de cálculo: es importante en la hidrología urbana considerar el tiempo de cálculo necesario para que un modelo determinado simule un período de lluvia dado. De hecho, es uno de los primeros criterios que los gestores urbanos del agua consideran para la elección de modelos de tormentas urbanas. El tiempo de cálculo rápido es incluso crucial en el caso de los modelos involucrados en los procesos de gestión en tiempo real. Para los modelos totalmente distribuidos, el tiempo de cálculo depende de dos factores; el tamaño de la cuenca y la resolución del modelo. Para el trabajo analizado, el modelo Multi-Hydro muestra un tiempo de cálculo rápido a gran escala de hasta 10 m (pocos minutos) y se necesita un gran tiempo de cálculo a escalas muy pequeñas [5 m, 2 m] (varios horas) (Figura 2-7). Esto se debe a la gran cantidad y tamaño de los resultados del modelo que se guardan para las necesidades de investigación. Las mejoras deben implementarse en la estructura del modelo para mejorar el rendimiento del modelo desde este punto de vista.

También el trabajo, realiza un análisis sobre la distribución espacio-temporal aplicada en una cuenca urbana.

- Se demostró que el impacto de la resolución de los datos de entrada de precipitación en las salidas hidráulicas disminuyó significativamente a medida que el área de drenaje de la cuenca aumenta. De otra manera, la pequeña cuenca urbana muestra muchas más necesidades de información de lluvia a pequeña escala.
- Los modelos de tormenta urbana parecen ser más sensibles a la variabilidad temporal de la lluvia que a su variabilidad espacial: este hallazgo se relacionó con la metodología de muestreo utilizada para la selección de resolución temporal menos detallada. De hecho, según [Ochoa-Rodriguez et al. \(2015\)](#), al promediar la información de precipitación espacio-temporal, los modelos muestran una sensibilidad comparable a la variabilidad espacial y temporal de la lluvia.

Teniendo en cuenta los problemas de escala y calidad de los datos, [Pedraza et al. \(2006\)](#), proponen un procedimiento de agregación espacial de esquemas de modelación y parámetros para la simulación del flujo de agua superficial en cuencas urbanas usando modelos basados en la onda cinemática. Esto permite pasar de una segmentación de una cuenca detallada a una escala más simple conservando una similitud hidrológica entre escalas. Lo realiza a través de la variación de la rugosidad efectiva del plano y verificando el equilibrio cinemático completo.

Esta sección sumada a las secciones anteriores dan una idea de la complejidad que conlleva la modelación hidrológica totalmente distribuida en ámbitos urbanos, donde se encuentra aún en exploración distintos tipos de modelos y estrategias para la resolución, análisis sobre la escala a utilizar, análisis sobre las áreas impermeables, etc.

Lo anterior, puede servir como guía para trabajar en el objetivo de explorar una metodología para modelar de manera totalmente distribuida una cuenca fuertemente antropizada con una gran porción ocupada por un área urbana.

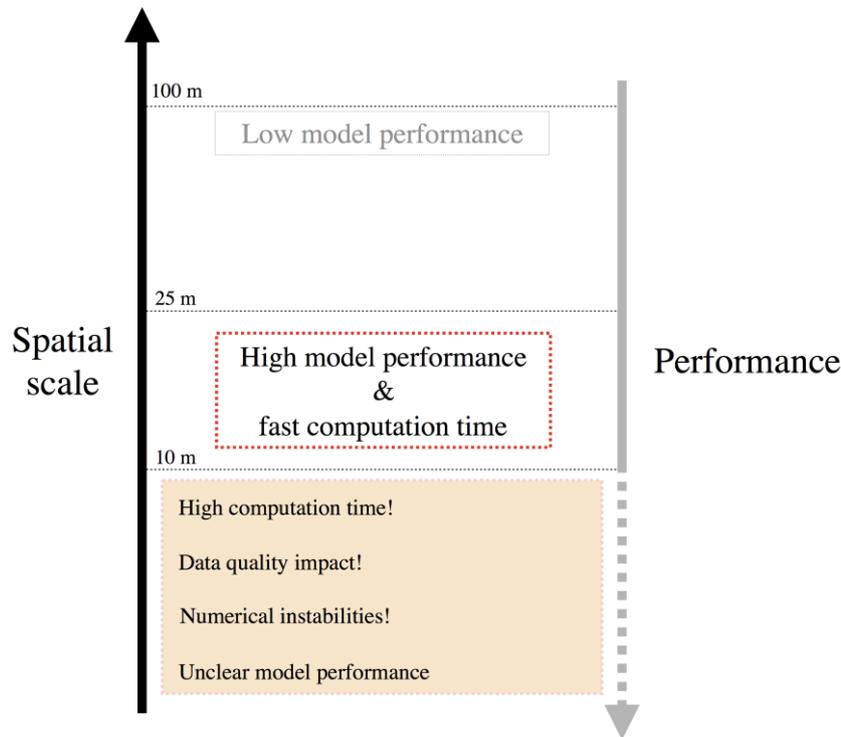


Figura 2-7 - Relación entre la resolución a utilizar en un modelo totalmente distribuido y su desempeño (Ichiba, 2016).

2.2. Modelo seleccionado para la modelación distribuida del escurrimiento superficial: TREX

A partir de lo anterior, se observó que los últimos avances en modelación totalmente distribuida de celdas de cuencas urbanas están siendo llevados a cabo con modelos con licencias o modelos libres como MultiHydro o Itzi. Teniendo en cuenta solo aquellos modelos que no poseen licencia se observó lo siguiente: por un lado el modelo MultiHydro fue imposible su obtención y por otro el modelo Itzi no estaba disponible al momento de comenzar el trabajo (año 2016), sumado a la experiencia ya adquirida anteriormente en la modelación totalmente distribuida con el modelo TREX se decidió utilizar en manera conjunta este modelo (siguiendo la idea original del trabajo) y SWMM para la modelación totalmente distribuida de una cuenca urbana. Sumado a lo anterior, se trata de dos modelos gratuitos y de código fuente abierto.

En TREX, como se mencionó anteriormente, se encuentran módulos adicionales para la simulación del transporte y deposición de sedimentos como así también el transporte y deposición de químicos. Sin embargo, estos dos módulos del modelo no serán utilizados, solamente el modelo hidrológico.

En cuanto al módulo hidrológico solo se simularán escurrimientos superficiales (overflow), es decir, no se simulará flujo unidimensional en canales abiertos. Para esto último se utilizará SWMM, que es un modelo computacional con más potencialidades en el punto de vista hidráulico que TREX.

2.2.1. Descripción del modelo

El modelo TREX (TwoDimensional Runoff Erosion and Export Model) surge como desarrollo del modelo CASC2D-SED. La estructura básica es un modelo basado en eventos que simula el flujo superficial, la erosión de la superficie del suelo y la deposición, flujo en canal y transporte de sedimentos a través de los cauces fluviales. Como parte del desarrollo de TREX, los componentes hidrológicos y de transporte de sedimentos de CASC2D se ampliaron de manera significativa y fueron mejorados para soportar el modelado de las inundaciones y el transporte de sustancias químicas ([Velleux, 2005](#), [England, 2006](#)).

Las siguientes secciones de esta descripción del modelo es una adaptación del manual de usuario de TREX ([HDR-HydroQual, 2011](#)).



Figura 2-8 - Símbolo del Modelo TREX.

2.2.2. Historia

Para conocer un poco de la historia de TREX hay que tener en cuenta que este modelo es la adaptación y la mejora del modelo CASC2D-SED.

CASC2D es un modelo que en el inicio fue desarrollado con un algoritmo de flujo bidimensional superficial (overland) escrito por P.Y. Julien en la Universidad Estatal de Colorado (EE.UU.). Luego, el algoritmo original fue convertido desde APL a FORTRAN por Saghafian en la misma universidad, con la adición del modelo de Green & Ampt para la infiltración, también se agregó el almacenamiento y un algoritmo para el escurrimiento en los canales según la onda difusiva.

Luego, en 1994 se agrega la rutina implícita para canales en CASC2D. Por 1995, el modelo es reformulado con la adición de capacidades de simulación continua y otros componentes hidrológicos, tales como interceptación, las profundidades iniciales, la evapotranspiración y redistribución. La erosión de la superficie y la sedimentación en los canales fue incorporada en 1997 basado en trabajos previos de [Kilinc y Richardson \(1973\)](#) en la Universidad Estatal de Colorado y se denominó al modelo CASC2D-SED.

Aproximadamente en 2005 se desarrolló TREX, como parte de la realización del modelo, los submodelos hidrológicos y de transporte de sedimentos de CASC2D se han mejorado significativamente, y se agregó el modelo de transporte de químicos. Dentro de TREX muchas características del código de CASC2D se han mejorado y otras se han agregado. En particular, el código TREX está diseñado para simular múltiples salidas de cuencas y para permitir también la simulación de la red de canales aguas arriba o debajo de las salidas. Esto permite la simulación de los afluentes trenzados y cauces distribuidos que puedan producirse en torno a los abanicos aluviales o de un sistema de ríos que se encuentren con un cuerpo de agua receptor grande en una pendiente baja. Otra mejora significativa es la adición de fuentes de puntos de flujo y sumideros.

2.2.3. Procesos hidrológicos considerados

El modelo simula los siguientes procesos:

- 1- Precipitación, intercepción y almacenamiento.
- 2- Infiltración y pérdida de transmisión.
- 3- Flujo en la tierra (overland) y en el canal.

Las variables de estado del modelo son la profundidad del agua en la superficie terrestre y los cauces fluviales. Las precipitaciones pueden ser uniformes o distribuidas en tiempo y espacio.

2.2.3.1. Precipitación, intercepción y almacenamiento.

La precipitación incluye la lluvia y nieve. Las nevadas pueden ser representadas como una altura equivalente (o volumen) de agua y puede ser expresada como una precipitación equivalente.

El volumen bruto del agua que llega cerca de la superficie es:

$$\frac{\delta V_g}{\delta t} = i_g \cdot A_s \rightarrow V_n = V_g - V_i \quad (2-1)$$

V_g = Volumen bruto de precipitación [L^3].

i_g = Intensidad bruta de precipitación [L/T].

t = Tiempo [T].

A_s = Superficie del área donde ocurre la precipitación [L^2].

V_i = Volumen interceptado [L^3].

V_n = Volumen neto [L^3].

La intercepción es la reducción del volumen bruto de precipitación por la retención de agua por la cobertura vegetal.

$$V_i = (S_i + Et_R)A_s \quad (2-2)$$

**MODELACIÓN HIDROLÓGICA-HIDRÁULICA TOTALMENTE DISTRIBUIDA DE UNA CUENCA
FUERTEMENTE ANTROPIZADA – CASO DEL RÍO CASCAVEL (GUARAPUAVA/PR, BRASIL)**

$$V_n = V_g - V_i \quad \text{para: } V_g > V_i \quad (2-3)$$

$$V_n = 0 \quad \text{para: } V_g \leq V_i \quad (2-4)$$

Dónde:

V_i = Volumen interceptado [L^3].

S_i = Capacidad de intercepción proyectada por la cubierta vegetal por unidad de área [L^3/L^2].

E = Velocidad de evaporación [L/T].

t_R = Duración del evento de precipitación [T].

V_n = Volumen neto [L^3].

El volumen de precipitación neta también se puede expresar como una tasa de precipitación neta. (Efectiva).

$$i_n = \frac{1}{A_s} \frac{\delta V_n}{\delta t} \quad (2-5)$$

Dónde:

i_n = Intensidad neta (efectiva) en la superficie [L/T].

El agua puede ser almacenada en las depresiones en la superficie de la tierra como pequeños charcos. La profundidad de almacenamiento de la depresión representa un umbral de limitación de la aparición de la escorrentía superficial.

2.2.3.2. Infiltración y pérdida de transmisión

En TREX se utiliza la relación de Green y Ampt, quienes desarrollaron una teoría física con una solución analítica exacta para simular la infiltración en la superficie terrestre.

Utilizando:

$$f = K_h \cdot \left(1 + \frac{H_c(1 - S_e) \theta_e}{F} \right) \quad (2-6)$$

Dónde:

f = Tasa de infiltración [L/T].

K_h = Conductividad hidráulica efectiva [L/T].

H_c = Altura de presión capilar de succión [L].

θ_e = Porosidad efectiva del suelo = $(\Phi - \theta_r)$ [adimensional].

Φ = Porosidad total del suelo [adimensional].

θ_r = Contenido residual de humedad del suelo [adimensional].

S_e = Saturación efectiva del suelo [adimensional]

F = Altura acumulada de agua infiltrada [L].

En los cauces, también se utiliza la relación de Green y Ampt para simular la infiltración:

$$t_i = K_h \cdot \left(1 + \frac{(H_w + H_c)(1 - S_e) \theta_e}{T} \right) \quad (2-7)$$

Dónde:

t_i = Tasa de pérdida de transmisión [T].

K_h = Conductividad hidráulica efectiva [L/T].

θ_e = Porosidad efectiva del suelo = $(\Phi - \theta_r)$ [adimensional].

Φ = Porosidad total del suelo [adimensional].

θ_r = Contenido residual de humedad del suelo [adimensional].

S_e = Saturación efectiva del suelo [adimensional].

T = Altura acumulada de agua transportada por pérdida de transmisión [L].

H_c = Altura de presión capilar de succión [L].

H_w = Altura de presión hidrostática (altura de agua sobre el canal) [L].

La infiltración es el proceso mediante el cual el agua penetra desde la superficie del terreno hacia el suelo. La velocidad a la que se produce la infiltración puede ser afectada por varios factores, como la conductividad hidráulica, la acción capilar y de la gravedad (percolación).

En la distribución de la humedad dentro del perfil de suelo pueden distinguirse 4 zonas:

Zona saturada: cerca de la superficie.

Zona de transmisión: de flujo no saturado y contenido de humedad aproximadamente uniforme.

Zona de mojado: la humedad decrece con la profundidad.

Frente de mojado: el cambio de contenido de humedad con la profundidad es tan grande que tiene la apariencia de una discontinuidad aguda entre el suelo mojado arriba y el suelo seco abajo (Figura 2-9).

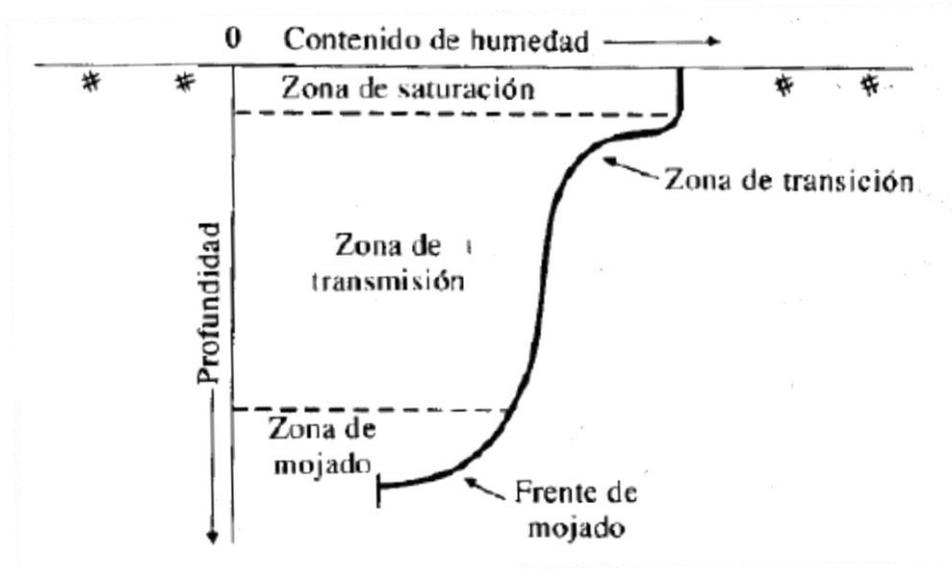


Figura 2-9 - Zonas de humedad durante el proceso de infiltración (Chow et al. 1994).

Se define la tasa de infiltración, f [cm/hora] como la tasa a la cual el agua entra al suelo en la superficie. Si existe encharcamiento en la superficie, la tasa de infiltración es igual a la tasa de infiltración potencial. La mayor parte de las ecuaciones de infiltración describen la tasa de infiltración potencial.

La infiltración acumulada, F , se define como el volumen acumulado de agua infiltrada dentro de un periodo de tiempo dado y es igual a la integral de la tasa de infiltración en ese periodo.

$$F(t) = \int_0^t f(\tau) d\tau \quad (2-8)$$

La tasa de infiltración es la derivada temporal de la infiltración acumulada:

$$f(t) = \frac{dF(t)}{dt} \quad (2-9)$$

Como se mencionó anteriormente en TREX se utiliza la relación de Green y Ampt. Estos autores desarrollaron una teoría física con una solución analítica exacta. Ellos propusieron el siguiente modelo simplificado (Figura 2-10).

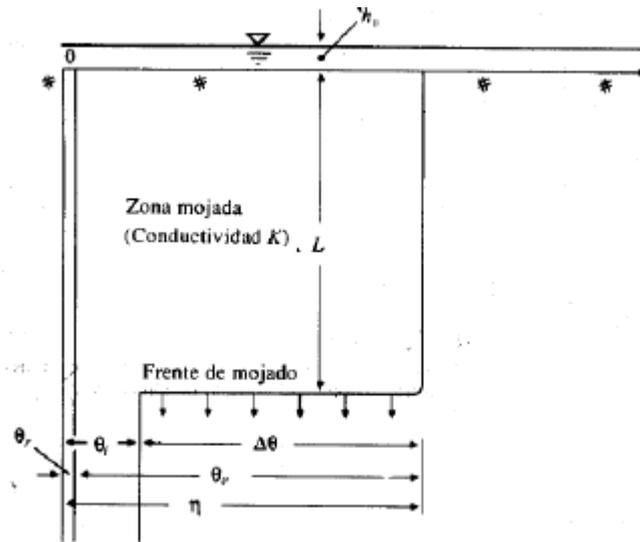


Figura 2-10 - Variables que intervienen en el modelo Green & Ampt ([Chow et al, 1994](#)).

La teoría de Green y Ampt considera un frente mojado que divide el suelo con contenido de humedad θ_i debajo del suelo saturado con contenido de humedad $\theta_s = \varphi$ (la porosidad total del suelo φ está simbolizada como η en la Figura 2-10). El frente mojado ha penetrado hasta una profundidad L desde el momento t en que empieza la infiltración. El agua se encharca en la superficie hasta una pequeña altura h_0 .

Si se considera una columna vertical de suelo de área transversal horizontal unitaria (Figura 2-11), se puede deducir que la cantidad de agua almacenada como resultado de la infiltración es $L(\varphi - \theta_i)$:

$$F(t) = L(\varphi - \theta_i) = L(\theta_s - \theta_i) = L\Delta\theta \quad (2-10)$$

Según la ley de Darcy:

$$q = -K \frac{dh}{dz} \quad (2-11)$$

En este caso el campo de flujo de Darcy q es constante a través de toda la profundidad y es igual a $-f$, debido a que q es positivo hacia arriba, mientras que f es positivo hacia abajo. Si el punto 1 coincide con la superficie del suelo y el punto 2 se localiza en el lado seco del frente de mojado, la ley de Darcy puede aproximarse por:

$$f = K \left(\frac{h_1 - h_2}{z_1 - z_2} \right) \quad (2-12)$$

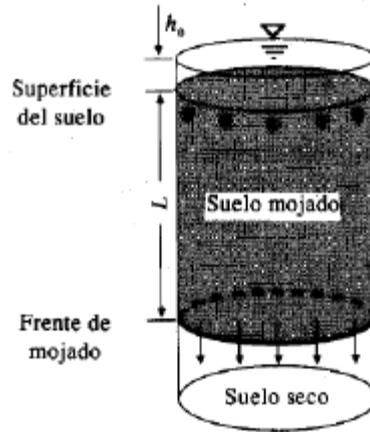


Figura 2-11 - Infiltración en una columna de suelo de área unitaria por el método de Green-Ampt (Chow et al, 1994).

La altura de carga en la superficie h_1 es igual a la profundidad de encharcamiento h_0 . La altura h_2 en el suelo seco por debajo del frente de mojado es $H_c - L$, entonces:

$$f = K \left(\frac{h_0 - (H_c - L)}{L} \right) \approx K \left(\frac{(H_c + L)}{L} \right) \quad (2-13)$$

Como $f = dF/dt$, entonces la ecuación anterior puede expresarse como:

$$\frac{dF}{dt} = K \left(\frac{H_c \Delta\theta + F}{F} \right) \quad (2-14)$$

Desarrollando matemáticamente e integrando se puede encontrar el valor de $F(t)$:

$$F(t) = Kt + H_c \Delta\theta \ln \left(1 + \frac{F(t)}{H_c \Delta\theta} \right) \quad (2-15)$$

Que es la ecuación de Green y Ampt para infiltración acumulada. Es una ecuación implícita en F resoluble por métodos iterativos.

La aplicación del modelo de Green y Ampt, requiere la estimación de la conductividad hidráulica, K , la porosidad, φ y la altura de succión del frente de mojado, H_c . La variación de la altura de succión y de la conductividad hidráulica con la humedad del suelo fue estudiada por Brooks y Corey, quienes concluyeron, en función de muchos ensayos de laboratorio, que H_c puede expresarse en función de una saturación efectiva, S_e .

Se define como humedad residual, θ_r al contenido de humedad después de haber drenado completamente el suelo. La saturación efectiva se define entonces como:

$$S_e = \frac{\text{humedad disponible}}{\text{max contenido de humedad posible}} = \frac{\theta - \theta_r}{\varphi - \theta_r} \quad (2-16)$$

Donde la diferencia $\varphi - \theta_r$ también se llama porosidad efectiva, θ_e .

De la ecuación anterior, para la condición inicial, $\theta = \theta_i = S_e \theta_e + \theta_r$, y la variación de humedad cuando pasa el frente de mojado es $\Delta\theta = H_c - \theta_i = (1 - S_e) \theta_e$.

Bouwer estudió la variación de la conductividad hidráulica, K , con el contenido de humedad y concluyó que K en flujo no saturado es aproximadamente la mitad que K en flujo saturado ([Chow et al, 1994](#)).

Para los eventos de tormenta única, la recuperación de la capacidad de infiltración de la evapotranspiración y percolación puede despreciarse.

2.2.3.3. Flujo superficial y en el canal

El flujo superficial puede ocurrir cuando la profundidad del agua en el plano terrestre supera el umbral de almacenamiento de la depresión. El flujo superficial se rige por la conservación de la masa (continuidad) y la conservación del momento. Las ecuaciones de continuidad para el flujo en dos dimensiones gradualmente variado, sobre un plano rectangular en coordenadas (x, y) son:

$$\frac{\partial h}{\partial t} + \frac{\partial q_x}{\partial x} + \frac{\partial q_y}{\partial y} = i_n - f + W = i_e \quad (2-17)$$

Dónde:

h = Altura de agua en la superficie [L].

q_x, q_y = Descarga unitaria en dirección x ó y = $Q_x / B_x, Q_y / B_y$. [L^2/T].

Q_x, Q_y = Caudal en dirección x ó y [L^3/T].

B_x, B_y = Ancho escurrimiento en dirección x ó y [L].

W = Descarga unitaria desde/hacia punto fuente/sumidero [L^3/T].

f =

i_e = Intensidad de precipitación en exceso [L/T].

i_n = Intensidad de precipitación neta (efectiva) sobre la superficie [L/T].

En forma completa y expresadas en forma adimensional, estas ecuaciones se conocen como las ecuaciones de Saint Venant. Éstas, se pueden simplificar al pasar por alto pequeños términos que describen los componentes de aceleración local y convectiva del momento, lo que resulta en la aproximación de la onda difusiva para direcciones x e y :

$$S_{fx} = S_{ox} - \frac{\partial h}{\partial x} \quad (2-18)$$

$$S_{fy} = S_{oy} - \frac{\partial h}{\partial y} \quad (2-19)$$

Dónde:

MODELACIÓN HIDROLÓGICA-HIDRÁULICA TOTALMENTE DISTRIBUIDA DE UNA CUENCA FUERTEMENTE ANTROPIZADA – CASO DEL RÍO CASCAVEL (GUARAPUAVA/PR, BRASIL)

S_{fx}, S_{fy} = Pendiente de fricción (línea de gradiente de energía) en dirección x ó y [adimensional].

S_{0x}, S_{0y} = Pendiente de la superficie del terreno en dirección x ó y [adimensional].

Suponiendo que el flujo es turbulento y la resistencia se puede describir utilizando la formulación de Manning (en unidades del SI), las relaciones de escurrimiento-profundidad son:

$$\begin{aligned} q_x &= \alpha_x + h^\beta \\ q_y &= \alpha_y + h^\beta \\ \alpha_x &= \frac{S_{fx}^{1/2}}{n} \\ \alpha_y &= \frac{S_{fy}^{1/2}}{n} \end{aligned} \quad (2-20)$$

α_x, α_y = Coeficiente de resistencia al flujo en dirección x ó y [$L^{1/3}/T$].

β = Exponente de resistencia = 5/3 [adimensional].

n = Coeficiente de rugosidad de Manning [$T/L^{1/3}$].

Lo mismo ocurre para el escurrimiento de los canales. Sólo que para representar el flujo de los mismos se considera sólo el movimiento en una dirección.

$$\frac{\partial A_c}{\partial t} + \frac{\partial Q}{\partial x} = q_i \quad (2-21)$$

A_c = Sección del área transversal al flujo [L^2].

Q = Caudal total [L^3/T].

q_i = Caudal lateral unitario (entrando o saliendo del canal) [L^2/T].

Para resolver las ecuaciones de flujo de canal para la continuidad y momento, la relación de Manning se puede utilizar para describir la resistencia al flujo.

$$Q = \frac{1}{n} A_c R_h^{2/3} S_f^{1/2} \quad (2-22)$$

Dónde:

R_h = Radio hidráulico = A_c / P_c [L].

P_c = Perímetro mojado del canal [L].

2.2.4. Modelación numérica

Para simular el proceso hidrológico, se deben asignar los valores para cada parámetro del modelo y las ecuaciones de balance de masa definidas en el marco conceptual deben ser resueltas.

Son necesarias técnicas de integración numérica para resolver las ecuaciones del modelo. TREX utiliza un volumen de control en el cual aplica el método de Euler para resolver la ecuación de balance de masa generalizada.

$$s|_{t+\Delta t} = s|_t + \left. \frac{\partial s}{\partial t} \right|_t \Delta t \quad (2-23)$$

$s|_{t+\Delta t}$ = Valor de la variable del modelo en el tiempo $t + \Delta t$.

$s|_t$ = Valor de la variable del modelo en el tiempo t .

$\left. \frac{\partial s}{\partial t} \right|_t$ = Valor de la derivada de la variable del modelo en el tiempo t .

Δt = Paso de tiempo para la integración numérica.

La solución numérica explícita se consigue mediante la segmentación de la cuenca hidrográfica entera en elementos cuadrados iguales, a los cuales se les asignan los parámetros relativos a las características de infiltración del suelo, coeficientes de rugosidad, y los parámetros de la erosión del suelo (Figura 2-12). Como cada parámetro está definido, se supone que es uniforme en toda el área de la celda, este valor actual es asignado a un punto central nodal.

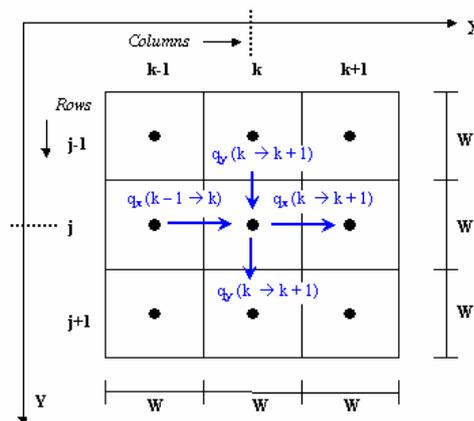


Figura 2-12 - Esquema de cálculo en TREX. (HDR-HydroQual, 2011).

2.2.4.1. Solución explícita para la infiltración

El método utilizado para determinar la profundidad de infiltración para cada paso de tiempo se basa en la profundidad total de infiltración acumulada. La capacidad de infiltración se compara entonces con la profundidad de la superficie existente dividida por

el paso de tiempo establecido (que representa la velocidad máxima posible a la que el agua superficial puede infiltrarse en la capa de suelo). Sobre la base de esta comparación, si la capacidad de infiltración es mayor que la tasa de infiltración máxima, toda el agua de la superficie se transformará en profundidad de infiltración local. A la inversa, si la capacidad es inferior a la velocidad máxima, entonces el valor de profundidad de la superficie dividida por el paso de tiempo se reduce la tasa de capacidad. Este resultado se multiplica entonces por el paso de tiempo para convertir de nuevo a un valor de profundidad.

El modelo TREX determina la infiltración para cada celda en la mitad del tiempo de paso dado, puesto que la ecuación de Green y Ampt es implícita con respecto al tiempo, se utiliza una solución de tiempo explícito, utilizando la siguiente expresión:

$$f^{t+\Delta t} = \frac{1}{2\Delta t} \left[P_1 + \sqrt{(P_1^2 + 8 P_2 \Delta t)} \right] \quad (2-24)$$

Dónde:

$$P_1 = (K_h \Delta t - 2F^t)$$

$$P_2 = (K_h F^t - K_h H_c \Delta M)$$

f = Tasa de infiltración.

H_c = Altura de presión capilar de succión.

K_h = Conductividad hidráulica efectiva.

ΔM = Déficit de humedad del suelo = $(1 - S_e)\theta_e$

θ_e = Porosidad efectiva del suelo = $(\varphi - \theta_r)$

φ = Porosidad total del suelo.

θ_r = Contenido residual de humedad del suelo.

S_e = Saturación efectiva del suelo.

F = Altura acumulada de agua infiltrada.

2.2.4.2. Solución explícita del escurrimiento superficial (overland)

La base fundamental para el flujo superficial de enrutamiento dentro de TREX se deriva del principio de conservación de masa. Para un fluido, este principio se puede aplicar como la relación de continuidad, mientras la suposición de incompresibilidad es válida. Cuando se aplica al modelo, la aplicación de este principio representa el flujo de la escorrentía de celda a celda. La ecuación aproximada de primer orden se puede aproximar como:

$$h^{t+\Delta t}(j, k) = h^t(j, k) + r_e \Delta t - \left[\frac{q_x^t(k \rightarrow k+1) - q_x^t(k-1 \rightarrow k)}{W} + \frac{q_y^t(j \rightarrow j+1) - q_y^t(j-1 \rightarrow j)}{W} \right] \quad (2-25)$$

Dónde:

$h^{t+\Delta t}(j, k)$ = altura de escurrimiento del elemento (j,k) en el tiempo t+ Δt .

$h^t(j, k)$ = altura de escurrimiento del elemento (j,k) en el tiempo t.

Δt = duración del paso de tiempo de cálculo.

r_e = exceso de precipitación media en un intervalo de tiempo.

$q_x^t(k \rightarrow k+1)$ = caudal unitario en la dirección x en el tiempo t desde la celda (j,k) a la celda (j,k+1).

$q_x^t(k-1 \rightarrow k)$ = caudal unitario en la dirección x en el tiempo t desde la celda (j, k-1) a la celda (j, k).

$q_y^t(j \rightarrow j+1)$ = caudal unitario en la dirección y en el tiempo t desde la celda (j, k) a la celda (k+1, k).

$q_y^t(j-1 \rightarrow j)$ = caudal unitario en la dirección y en el tiempo t desde la celda (j-1, k) a la celda (j, k).

W = longitud del lado de celda cuadrada.

Los términos de unidad de flujo tipo (caudales unitarios) utilizados en la ecuación anterior se determinan en el modelo por una forma discretizada de la ecuación de rugosidad de Manning, que supone que todo el flujo está dentro del régimen turbulento. La dirección y velocidad de flujo para cada unidad y para un momento dado es estrictamente dependiente de su relación con la pendiente de fricción, S_f , que se muestra en las siguientes ecuaciones para la dirección x:

$$S_{fx}^t(k-1 \rightarrow k) \approx S_{0x}^t(k-1 \rightarrow k) - \frac{h^t(j, k) - h^t(j, k-1)}{W} \quad (2-26)$$

Donde S_0 es expresado en términos de la elevación (E):

$$S_{0x}^t(k-1 \rightarrow k) \approx \frac{E(j, k-1) - E(j, k)}{W} \quad (2-27)$$

El caudal unitario es calculado dependiendo dos casos:

$$q_x^t(k-1 \rightarrow k) = \frac{1}{n(j, k-1)} [h^t(j, k-1)]^{5/3} [S_{fx}^t(k-1 \rightarrow k)]^{1/2} \text{ si } S_{fx}^t(k-1 \rightarrow k) \geq 0 \quad (2-28)$$

$$q_x^t(k-1 \rightarrow k) = \frac{-1}{n(j, k-1)} [h^t(j, k-1)]^{5/3} [-S_{fx}^t(k-1 \rightarrow k)]^{1/2} \text{ si } S_{fx}^t(k-1 \rightarrow k) < 0$$

2.2.4.3. Solución explícita para el escurrimiento en cauces

El proceso por el cual TREX realiza el escurrimiento a través de una red de canales definidos, se basa en una ecuación unidimensional de aproximación de la onda de régimen difusivo. Este esquema es matemáticamente similar al utilizado para los cálculos del flujo superficial. Al progresar el modelado del evento de lluvia, el flujo superficial se va trasladando a través de los planos terrestres hasta que el flujo llega a un canal (Figura

MODELACIÓN HIDROLÓGICA-HIDRÁULICA TOTALMENTE DISTRIBUIDA DE UNA CUENCA FUERTEMENTE ANTROPIZADA – CASO DEL RÍO CASCAVEL (GUARAPUAVA/PR, BRASIL)

2-13). Este flujo se transforma entonces en un componente de flujo de canal y se envía a través de la red que forman los mismos hasta la ubicación de salida definida.

La red de canales que se definen en un proyecto de TREX se compone de enlaces, numerados de acuerdo con el orden de cálculo. Esta red de canales se identifican en un mapa de links o canales (Figura 2-14). A su vez, un enlace de canal se compone de células conectadas a la red, llamado los nodos de ese enlace particular que también se ingresan al programa como un mapa de nodos (Figura 2-15). Cada nodo representa una porción de ese canal y al cual se le pueden definir sus características geométricas e hidráulicas. Esto se realiza a través de un archivo de texto en donde se determinan las características de cálculo (ancho de canal, n de Manning, talud, etc.) de cada nodo de cada canal identificado en los mapas anteriormente descritos. El flujo se produce desde el centro de una celda al centro de la celda en cualquiera de las ocho direcciones de flujo.

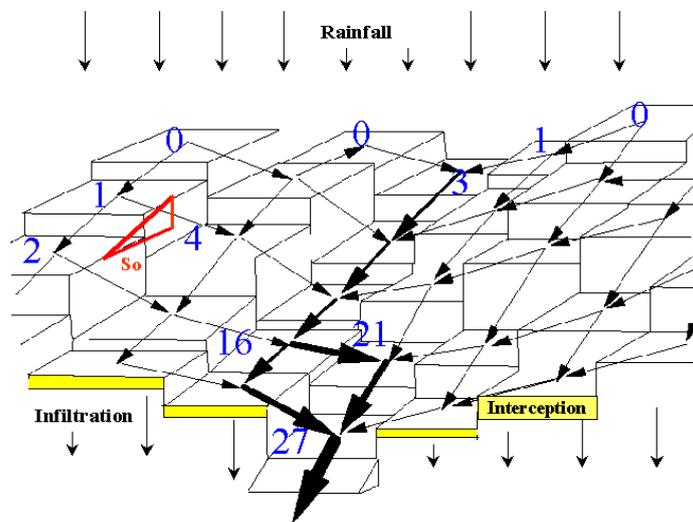


Figura 2-13 – Esquema de cálculo en las distintas celdas de superficie en TREX. (HDR-HydroQual, 2011).

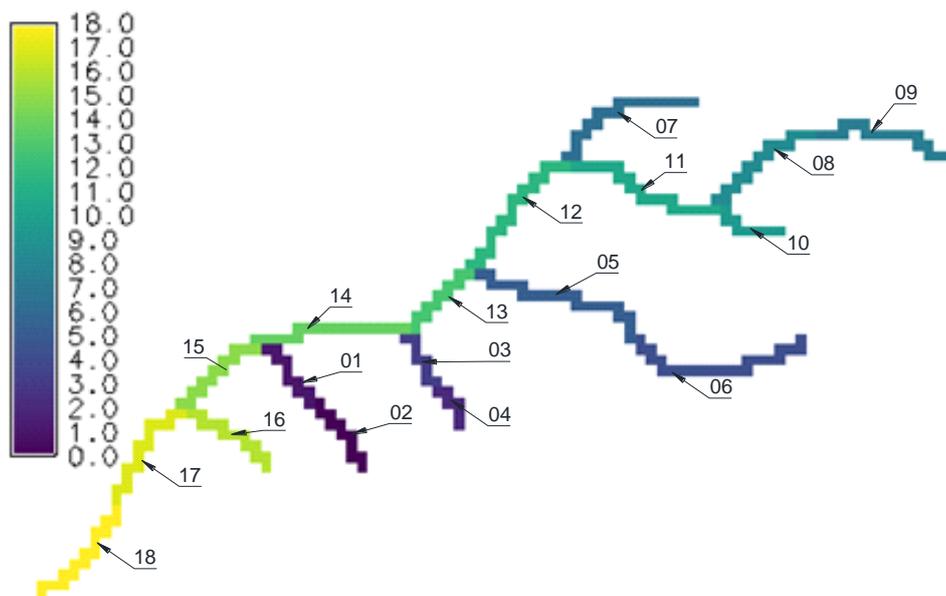


Figura 2-14 – Mapa de cauces o links.



Figura 2-15 – Mapa de nodos que componen cada cauce.

2.2.5. Implementación computacional

El código fuente de TREX está escrito en C y cumple con las convenciones ANSI C99. TREX es una aplicación de cálculo intensivo.

TREX opera desde una interfaz de línea de comandos (el símbolo del sistema en el sistema operativo Windows o el intérprete de comandos en Linux).

En su modo más básico de operación, TREX requiere que el usuario especifique un argumento. Este argumento es la ruta y nombre del archivo principal de entrada de TREX. Éste proporciona los parámetros básicos del modelo de entrada que controlan una simulación y también contiene los nombres de los archivos auxiliares de entrada del modelo que definen las características específicas de la simulación, como la máscara de frontera de la cuenca, las elevaciones, las clases de suelo y uso de la tierra, etc. Cuando se ejecuta desde el símbolo del sistema bajo el sistema operativo Windows, la secuencia de comandos para iniciar la ejecución de una simulación TREX es de la forma:

```
C:\TREX.exe inputfilename.inp
```

Del mismo modo, cuando se ejecuta desde un intérprete de comandos en el sistema operativo Linux, la secuencia de comandos se encuentra en la forma:

```
/home/username/path/to/input/TREX.x inputfilename.inp
```

Durante la ejecución, TREX genera una serie de archivos de salida. Dependiendo del número de celdas en el dominio espacial, el número de variables de estado simuladas y la frecuencia de la información, el tamaño del conjunto de los archivos de salida del modelo pueden ser bastante grandes (> 5 GB).

MODELACIÓN HIDROLÓGICA-HIDRÁULICA TOTALMENTE DISTRIBUIDA DE UNA CUENCA FUERTEMENTE ANTROPIZADA – CASO DEL RÍO CASCAVEL (GUARAPUAVA/PR, BRASIL)

TREX tiene un archivo de entrada principal que controla la mayoría de los aspectos de la simulación. Dentro de este archivo de entrada principal, las entradas se dividen en seis grupos de parámetros relacionados (Grupos de datos de A a F).

El archivo de entrada principal también especifica una serie de archivos de entrada auxiliares que se requieren para operar el modelo. Los archivos de modelos auxiliares de entrada se utilizan para definir las características específicas de la simulación como la máscara de los límites de cuencas hidrográficas, la elevación, clases de suelos y uso de la tierra, etc.

Dentro del archivo de entrada principal, la información se divide en seis grupos (grupos de datos) según los parámetros relacionados. Los datos del grupo A se utilizan para especificar los controles generales de la simulación, tales como el tipo de simulación y la serie de pasos de tiempo que se utilizarán para la integración numérica. Los del Grupo B se utilizan para especificar los parámetros para las simulaciones hidrológicas. En el Grupo C se especifican los parámetros para las simulaciones de transporte de sedimentos. El Grupo D se utiliza para especificar los parámetros para las simulaciones de transporte de productos químicos. En el Grupo E se ingresan los parámetros de las condiciones ambientales tales como temperatura del aire y velocidad del viento. Los datos del Grupo F se utilizan para especificar los parámetros para el control de salida del modelo. En la actualidad, no todas las combinaciones posibles de entradas del modelo se pueden aplicar plenamente ya que se encuentran todavía en desarrollo.

Durante la simulación, TREX genera una ventana emergente, la cual no se puede cerrar, en donde se visualiza paso a paso como va avanzando la modelación (Figura 2-16)



```

D:\Documents and Settings\Administrador\Mis documentos\Proyecto Final\Tor...
*****
*****
* Reading Initial Water Depth Channel File *
*****

*****
* Reading Data Group E *
*****

*****
* Reading Data Group F *
*****

*****
* Beginning TREX Simulation *
*****

Time Series printout time = 0.000000 Simulation Time (hours) = 0.000000
Time Series printout time = 0.100000 Simulation Time (hours) = 0.102777
Time Series printout time = 0.200000 Simulation Time (hours) = 0.202777
Time Series printout time = 0.300000 Simulation Time (hours) = 0.302777
Time Series printout time = 0.400000 Simulation Time (hours) = 0.402777
Time Series printout time = 0.500000 Simulation Time (hours) = 0.502777
Time Series printout time = 0.600000 Simulation Time (hours) = 0.602777
Time Series printout time = 0.700000 Simulation Time (hours) = 0.702777
Time Series printout time = 0.800000 Simulation Time (hours) = 0.802777

```

Figura 2-16 - Visualización de la simulación de TREX en Windows.

2.3. Modelo seleccionado para la modelación hidráulica: SWMM

Como se mencionó anteriormente, se seleccionó el modelo SWMM para utilizar conjuntamente con el modelo TREX. La finalidad es utilizar SWMM para la simulación del flujo en conductos, canales y embalses.

2.3.1. Descripción del modelo

El *Stormwater Management Model* (modelo de gestión de aguas pluviales) de la EPA (SWMM) es un modelo dinámico de simulación de precipitaciones, que se puede utilizar para un único acontecimiento o para realizar una simulación continua en período extendido ([Rossman 2010, 2015](#)).

SWMM se desarrolló por primera vez en 1971, habiendo experimentado desde entonces diversas mejoras.

El modelo dispone de tres grandes módulos de cálculo:

- El módulo hidrológico de SWMM funciona con una serie de subcuencas sobre las cuales cae el agua de lluvia y se genera la escorrentía.
- El módulo hidráulico de SWMM analiza el transporte de estas aguas a través de un sistema compuesto por tuberías, canales, dispositivos de almacenamiento y tratamiento, bombas y elementos reguladores.
- El módulo de calidad permite a SWMM seguir la evolución de la calidad del agua de escorrentía de cada subcuenca y también en cada tubería y canal durante una simulación compuesta por múltiples intervalos de tiempo.

2.3.1.1. Modelo conceptual utilizado en SWMM

SWMM representa el comportamiento de un sistema de drenaje mediante una serie de flujos de agua y materia entre los principales módulos que componen un análisis medioambiental. Estos módulos y sus correspondientes objetos de SWMM son los siguientes:

- El Módulo Meteorológico, desde el cual se analiza la lluvia caída y los contaminantes depositados sobre la superficie del suelo, que se analiza en el Módulo de Superficie del Suelo. SWMM utiliza el objeto Pluviómetro para representar las entradas de lluvia en el sistema.
- El Módulo de Superficie del Suelo, que se representa a través de uno o más objetos cuenca. Estos objetos reciben la precipitación del Módulo Atmosférico en forma de lluvia o nieve; y generan flujos de salida en forma de infiltración para el Módulo de Aguas Subterráneas y también como escorrentía superficial y cargas de contaminantes para el Módulo de Transporte.

- El Módulo de Aguas Subterráneas, recibe la infiltración del Módulo de Superficie del Suelo y transfiere una parte de la misma como flujo de entrada para el Módulo de Transporte. Este módulo se modela utilizando los objetos Acuíferos (Acuíferos).

- El Módulo de Transporte, contiene una red con elementos de transporte (canales, tuberías, bombas y elementos de regulación) y unidades de almacenamiento y tratamiento que transportan el agua hacia los Nodos de Vertido (outfall) o las estaciones de tratamiento. Los flujos de entrada de este Módulo pueden provenir de la escorrentía superficial, de la interacción con el flujo subterráneo, de los caudales sanitarios correspondientes a periodos sin lluvia, o de hidrogramas de entrada definidos por el usuario. Los componentes del Módulo de Transporte se modelan con los objetos Nodos y Líneas.

En un determinado modelo de SWMM no es necesario que aparezcan todos los Módulos descritos anteriormente. Por ejemplo, un modelo puede tener tan solo el Módulo de Transporte, utilizando como entradas unos hidrogramas previamente definidos, debido a que en este proyecto sólo se utiliza el Módulo de transporte, a partir de este momento sólo se refiere en esta sección a este Módulo.

2.3.1.2. Modelo hidráulico de transporte (Flow Routing)

El transporte de agua por el interior de cualquiera de los conductos representados en SWMM está gobernado por las ecuaciones de conservación de la masa y de la cantidad de movimiento tanto para el flujo gradualmente variado como para el flujo transitorio (es decir, las ecuaciones de Saint Venant). Es posible elegir el nivel de sofisticación que se desea para resolver las ecuaciones anteriormente mencionadas. Es por eso que existen tres modelos de transporte.

- a) El Flujo Uniforme.
- b) La Onda Cinemática.
- c) La onda dinámica.

Flujo Uniforme

El modelo de flujo uniforme representa la forma más simple de representar el comportamiento del agua en el interior de los conductos. Para ello se asume que en cada uno de los incrementos de tiempo de cálculo considerados el flujo es uniforme. De esta forma el modelo simplemente traslada los hidrogramas de entrada en el nudo aguas arriba del conducto hacia el nudo final del mismo, con un cierto retardo y cambio en el aspecto del mismo. Para relacionar el caudal con el área y el tirante en el conducto se emplea la ecuación de Manning.

Este tipo de modelo hidráulico no puede tener en cuenta el almacenamiento de agua que se produce en los conductos, los fenómenos de resalto hidráulico, las pérdidas a la entrada y salida de los pozos de registro, el flujo inverso o los fenómenos de flujo presurizado. Solo puede utilizarse en sistemas ramificados, donde cada uno de los nodos tiene únicamente una única línea hacia la que vierte sus aguas (a menos que el nudo sea un divisor en cuyo caso requiere de dos tuberías de salida). Este modelo de análisis es

insensible al incremento de tiempo seleccionado y únicamente es apropiado para realizar análisis preliminares utilizando simulaciones continuas de escalas de tiempo grandes.

Modelo de la onda cinemática (Kinematic Wave)

Este modelo hidráulico de transporte resuelve la ecuación de continuidad junto con una forma simplificada de la ecuación de cantidad de movimiento en cada una de las conducciones. Esta última requiere que la pendiente de la superficie libre del agua sea igual a la pendiente de fondo del conducto.

El caudal máximo que puede fluir por el interior de un conducto es el caudal a tubo lleno determinado por la ecuación de Manning. Cualquier exceso de caudal sobre este valor en el nudo de entrada del conducto se pierde del sistema o bien puede permanecer estancado en la parte superior del nudo de entrada y entrar posteriormente en el sistema cuando la capacidad del conducto lo permita.

El modelo de la onda cinemática permite que tanto el caudal como el área varíen tanto espacial como temporalmente en el interior del conducto. Esto origina una cierta atenuación y retraso en los hidrogramas de salida respecto de los caudales de entrada en los conductos. No obstante, este modelo de transporte no puede considerar efectos como el resalto hidráulico, las pérdidas en las entradas o salidas de los pozos de registro, el flujo inverso o el flujo presurizado, así como su aplicación está restringida únicamente a redes ramificadas. Como práctica general puede mantener una estabilidad numérica adecuada con incrementos de tiempo de cálculo relativamente grandes, del orden de 5 a 15 minutos.

Si algunos de los efectos especiales mencionados con anterioridad no se presentan en el sistema o no son significativamente importantes en el mismo el modelo de la onda cinemática es una alternativa suficientemente precisa y eficiente para el modelo de transporte con tiempos de simulación largos.

Modelo de la onda dinámica (Dynamic Wave)

El modelo de transporte de la Onda Dinámica (Dynamic Wave Routing) resuelve las ecuaciones completas unidimensionales de Saint Venant y por tanto teóricamente genera los resultados más precisos. Estas ecuaciones suponen la aplicación de la ecuación de continuidad y de cantidad de movimiento en las conducciones y la continuidad de los volúmenes en los nodos.

Con este tipo de modelo de transporte es posible representar el flujo presurizado cuando una conducción cerrada se encuentra completamente llena, de forma que el caudal que circula por la misma puede exceder del valor de caudal a tubo completamente lleno obtenido mediante la ecuación de Manning. Las inundaciones ocurren en el sistema cuando la profundidad (tirante) del agua en los nodos excede el valor máximo disponible en los mismos. Este exceso de caudal bien puede perderse o bien puede generar un estancamiento en la parte superior del nudo y volver a entrar al sistema de saneamiento posteriormente.

El modelo de transporte de la Onda Dinámica puede contemplar efectos como el almacenamiento en los conductos, los resaltos hidráulicos, las pérdidas en las entradas y

salidas de los pozos de registro, el flujo inverso y el flujo presurizado. Dado que resuelve de forma simultánea los valores de los niveles de agua en los nodos y los caudales en las conducciones puede aplicarse para cualquier tipo de configuración de red de saneamiento, incluso en el caso de que contengan nodos con múltiples divisiones del flujo aguas abajo del mismo o incluso mallas en su trazado. Se trata del método de resolución adecuado para sistemas en los que los efectos de resalto hidráulico, originados por las restricciones del flujo aguas abajo y la presencia de elementos de regulación tales como orificios y vertederos, sean importantes. El precio que generalmente es necesario pagar por el empleo de este método es la necesidad de utilizar incrementos de tiempo de cálculo mucho más pequeños, del orden de 1 minuto o menos. Durante el cálculo SWMM reducirá automáticamente el incremento de tiempo de cálculo máximo definido por el usuario si es necesario para mantener la estabilidad numérica del análisis.

2.3.1.3. Componentes físicos (Visual Objets) utilizados

Los componentes físicos que se representaron en el sistema de drenaje de aguas son los siguientes:

Nodos de Conexión

Las conexiones son nodos del sistema de drenaje donde se conectan diferentes líneas entre sí. Físicamente pueden representar la confluencia de canales superficiales naturales, pozos de registro (manholes) del sistema de drenaje, o elementos de conexión de tuberías. Los aportes externos de caudal entran en el sistema a través de las conexiones. El exceso de agua en un nudo se traduce en un flujo parcialmente presurizado mientras las conducciones conectadas se encuentren en carga. Este exceso de agua puede perderse completamente del sistema o por el contrario estancarse en la parte superior para posteriormente volver a entrar de nuevo en la conexión.

Los parámetros principales de entrada de una conexión son:

- Cota de fondo o fondo del pozo que puede encontrarse en la conexión.
- Profundidad del pozo.
- Área superficial del área estancada cuando se produce un fenómeno de inundación.
- Datos de aportes externos de caudal (opcional).

Nodos de vertido

Los Nodos de Vertido son nodos terminales del sistema de drenaje utilizados para definir las condiciones de contorno finales aguas abajo del sistema en el caso de utilizar el modelo de flujo de la Onda Dinámica (Dynamic Wave). Para otros tipos de flujo, los nodos de vertido se comportan como conexiones. Una restricción del modelo es que solo es posible conectar una línea con un Nudo de Vertido.

Las condiciones de contorno en los Nodos de Vertido pueden describirse mediante una de las siguientes relaciones:

- El tirante crítico o el tirante uniforme en la conexión con el conducto.
- Un nivel fijo de agua.

- El nivel de mareas representado como los diferentes niveles de la misma a lo largo del día.
- Una serie temporal que represente el nivel de agua en el punto de descarga a lo largo del tiempo.

Los parámetros de entrada principales de un Nudo de Vertido son:

- La cota de fondo.
- La descripción del tipo y estado de la condición de contorno.
- La presencia de una válvula de compuerta (flat valve) para prevenir el flujo inverso desde el Nudo de Vertido.

Conductos

Los conductos son tuberías o canales por los que se desplaza el agua desde un nudo a otro del sistema de transporte. Es posible seleccionar la sección transversal las distintas variedades de geometrías abiertas y cerradas definidas en el programa. Asimismo el programa permite también definir áreas de sección transversal irregular permitiendo representar con ello cauces naturales.

SWMM emplea la ecuación de Manning para establecer la relación entre el caudal que circula por el conducto (Q), la sección del mismo (A), su radio hidráulico (R_h) y la pendiente (S) tanto para canales abiertos como para conductos cerrados parcialmente llenos. En unidades anglosajonas la ecuación de Manning se escribe:

$$Q = \left(\frac{1.49}{n}\right) * A * R_h^{\frac{2}{3}} * (S)^{0.5} \quad (2-29)$$

Asimismo, dicha ecuación en unidades del Sistema Internacional se expresa como:

$$Q = \left(\frac{1}{n}\right) * A * R_h^{\frac{2}{3}} * (S)^{0.5} \quad (2-30)$$

Donde n es el coeficiente de rugosidad de Manning. Para el caso del Flujo Uniforme (Steady Flow) y para el caso del análisis mediante la Onda Cinemática (Cinematic Wave) S se interpreta como la pendiente de la conducción. En el caso de emplear el Modelo de la Onda Dinámica (Dynamic Wave) se interpreta como la pendiente hidráulica del flujo (es decir, la pérdida por unidad de longitud).

Los principales parámetros de entrada para las conducciones son:

- Nombres de los nodos de entrada y salida.
- Alturas del conducto respecto de la cota de fondo de los nodos inicial y final.
- Longitud del conducto.
- Coeficiente de Manning.
- Geometría de la sección transversal del conducto.
- Coeficiente de pérdidas tanto para la entrada como para la salida del conducto.
- Presencia de una válvula de compuerta para prevenir el flujo inverso.

Sistema de almacenamiento

Los sistemas de almacenamiento son nodos del sistema de drenaje con la capacidad para almacenar determinados volúmenes de agua. Físicamente pueden representar desde sistemas de almacenamiento pequeños, como reducidos cuencos de almacenamiento, hasta sistemas grandes como lagos. Las propiedades volumétricas de un sistema de almacenamiento se representan como una tabla o una función que indica la superficie de almacenamiento en función de la altura del mismo.

Los principales parámetros de entrada de un sistema de almacenamiento son:

- La cota de fondo.
- La altura máxima del mismo.
- La tabla de datos que relaciona la altura del sistema de almacenamiento con la superficie del mismo.
- La proporción de evaporación que se produce en el sistema de almacenamiento.
- Superficie de almacenamiento del agua estancada cuando se produce inundación. Es un parámetro opcional que se simula en el caso que se encuentre activada o no la opción Allow Ponding (Permitir inundación).
- Los datos de aportes externos de caudal.

Reguladores de caudal (Flow Regulators)

Los reguladores de caudal son estructuras y dispositivos utilizados para controlar y derivar los caudales dentro del sistema de transporte. Físicamente se emplean para:

- Control de las emisiones desde las unidades de almacenamiento.
- Prevención de fenómenos de entrada en carga inaceptables de conductos.
- Derivación de caudales para su tratamiento en los sistemas de intercepción.

Los elementos reguladores de caudal que SWMM puede modelar son los siguientes:

- Orificios (orificies).
- Vertederos (weirs).
- Descargas (outlets).

Orificios (orificies)

Los orificios se emplean para modelar descargas y estructuras de derivación en los sistemas de drenaje. Estos elementos normalmente son aperturas en las paredes de los pozos de registro, sistemas de almacenamiento o compuertas de control. Estos elementos en SWMM se representan como una línea que conecta dos nodos entre sí. Un orificio puede tener bien una forma circular o bien una forma rectangular, estar localizado bien en la parte superior o bien en el nudo aguas arriba del conducto, y eventualmente puede disponer de una válvula de compuerta para prevenir el flujo inverso.

Los orificios se pueden utilizar como sistemas de descarga de las unidades de almacenamiento en cualquiera de los modelos hidráulicos contemplados en el programa. A menos que estos elementos se encuentren vinculados a un nudo con unidad de almacenamiento, en este caso, solo puede emplearse en sistemas de drenaje utilizando el modelo hidráulico de la Onda Dinámica (Dynamic Wave).

Los principales parámetros de entrada de un orificio son:

- Nombre de los nodos de entrada y salida del orificio.
- Configuración, definiendo si el orificio se encuentra en la parte superior o en un lateral.
- Forma del orificio, indicando si es circular o rectangular.
- Altura del orificio sobre la cota de fondo del nudo.
- Coeficiente de descarga del orificio.

Vertederos (Weirs)

Los vertederos, al igual que los orificios, se emplean para modelar descargas y estructuras de separación del flujo en sistemas de drenaje. Los vertederos se localizan normalmente en los pozos de registro, a lo largo de uno de los lados de los conductos o canales, o bien en los sistemas de almacenamiento. Internamente se representan en SWMM como una línea que une dos nodos, donde el vertedero en sí mismo se ubica en el nudo aguas arriba. Estos elementos pueden incluir también una válvula de compuerta para prevenir el flujo inverso.

El modelo SWMM puede representar cuatro tipos de vertederos como ser: transversal con sección transversal rectangular, descarga lateral con sección transversal rectangular, en V con sección transversal triangular y trapezoidal con sección transversal trapezoidal.

Los principales parámetros de entrada de un vertedero son:

- Nombre de los nodos de entrada y salida del vertedero.
- Forma y geometría del vertedero.
- Altura de la cresta del vertedero sobre la cota del fondo del nudo de entrada.
- Coeficiente de descarga.

Descargas (Outlets)

Las descargas (outlets) son dispositivos de control del caudal que se emplean de forma habitual para controlar los caudales de descarga de las unidades de almacenamiento. Se emplean para modelar sistemas con relaciones especiales entre la altura y el caudal de descarga que no pueden ser caracterizados por bombas, orificios o vertederos. Las descargas se representan en SWMM mediante una línea conectada entre dos nodos. Asimismo cualquiera de las descargas puede disponer de una válvula de compuerta que impide el flujo en una de las direcciones.

El flujo a través de la descarga se especifica mediante una tabla definida por el usuario que indica el flujo de caudal en función de las diferencias de altura en la misma.

Los principales parámetros de una descarga son:

- Nombre de los nodos de entrada y salida de la descarga.
- Altura sobre la cota de fondo del nudo de entrada.
- Función o tabla que indica la relación entre la altura y el caudal descargado por el vertedero.

2.3.1.4. Componentes virtuales (sin representación gráfica) utilizados

Además de los objetos físicos que pueden ser visualizados en el mapa, SWMM utiliza objetos virtuales para describir cada proceso, así como sus características adicionales dentro de un área de estudio. Se utilizaron los siguientes objetos virtuales:

Aportes externos de caudal (external inflows)

Los nodos del sistema de drenaje pueden recibir tres tipos de aportes externos de caudal:

- Aportes directos de caudal (Direct Inflows). Se trata de series temporales de valores de caudales que entran directamente en el nudo definidos por el usuario. Pueden utilizarse para representar el modelo hidráulico de caudales y calidad de agua en ausencia de cálculos de escorrentía (tal como puede ocurrir en sistemas en los que no se definen cuencas).

- Caudales de tiempo seco (Dry Weather Inflows). Existen continuas entradas de caudal que reflejan las contribuciones que los caudales de aguas negras realizan al sistema de drenaje. Puede considerarse estos caudales como unos caudales de referencia de los conductos o canales. Estos caudales se representan mediante un caudal de entrada medio que puede ajustarse de forma periódica, bien mensualmente, diariamente y de hora en hora mediante la aplicación de unos patrones (Time Pattern) que multiplican el valor introducido como referencia.

- Entradas e Infiltraciones relacionados con las Lluvias (Rainfall-Derived Infiltration/Inflow, RDII). Se trata de caudales que provienen de las aguas de lluvia que se introducen en los sistemas de saneamiento (bien unitarios bien separativos) debido a aportes directos en las conexiones con los pozos de registro, en los colectores de bombeos, en el fondo de los sistemas de drenaje, etc.; así como de las infiltraciones de aguas subsuperficiales a través de roturas en las conducciones, fugas en las conexiones, malas conexiones de los pozos de registro, etc. Los caudales RDII pueden calcularse para los datos de una determinada lluvia basándose en una serie de hidrogramas unitarios que establecen la respuesta a corto plazo, medio plazo y largo plazo en cada uno de los períodos de tiempo de la lluvia definida. Los caudales RDII pueden también definirse como ficheros externos de caudales RDII.

Las entradas de caudal de aporte directo, de tiempo seco y de RDII son propiedades asociadas a cada tipo de nudo del sistema de saneamiento (conexiones, nodos de vertido, divisores de caudal, y unidades de almacenamiento) y puede especificarse al editarse las propiedades del nudo. También es posible emplear los caudales de salida generados de un determinado sistema de saneamiento situado aguas arriba como entrada de otro sistema situado aguas abajo. Para ello es necesario utilizar archivos como interface de intercambio de dicha información.

2.3.1.5. Curvas (Curves)

Las curvas son objetos definidos en SWMM para establecer la relación entre dos cantidades. Los diferentes tipos de curva disponibles en SWMM son:

- Curva de almacenamiento (Storage curve), que describen como varia la superficie de una unidad de almacenamiento, representada en un nudo, con la profundidad de agua en el mismo.
- Curvas de división (Diversion Curve), que permiten representar el caudal de salida dividido respecto del caudal de entrada en uno de los Divisores del Caudal.
- Curvas de marea (tidal curves) que describen como varían las condiciones de un Nudo de vertido a lo largo del día.
- Curvas de bombas (pump curves) que relacionan el caudal que impulsa la bomba, con la profundidad o bien con el volumen de agua en el nudo aguas arriba de la misma. También se puede relacionar con la altura de fricción suministrada por el fabricante de la bomba (curva característica).
- Curvas de descarga (Rating curves) que relacionan el caudal a través de una de las líneas de descarga (outlets) con la diferencia de alturas en la misma.

Cada una de las curvas debe tener su propio nombre identificativo que ha de ser único dentro de un mismo proyecto de SWMM. A cada una de estas curvas se le puede asignar tantos datos como se desee.

2.3.1.6. Series temporales de datos (Serie Temporal)

Las series temporales de datos son objetos definidos en SWMM para describir determinadas propiedades de alguno de los objetos del proyecto que varían con el tiempo. Estas series temporales pueden utilizarse para introducir:

- Los datos de temperatura.
- Los datos de evaporación.
- Los datos de lluvia.
- Los niveles en los nodos de descarga.
- Hidrogramas externos de entrada de caudal al sistema de saneamiento a través de los nodos.

Cada una de las series temporales debe tener su propio nombre identificativo que ha de ser único dentro de un mismo proyecto de SWMM. A cada una de estas series temporales se le puede asignar tantos datos como se desee. El tiempo se especifica en horas desde el inicio de la simulación o bien como una referencia absoluta con una fecha y hora concreta.

Capítulo 3: Área de estudio

Este capítulo, se desarrolló en base a la información presentada en los trabajos de [Oliveira \(2011\)](#) y [Gomes \(2014\)](#).

3.1. Ubicación de la cuenca

El área de estudio es la cuenca hidrográfica del Río Cascavel, en el municipio de Guarapuava, Paraná, Brasil (Figura 3-1).

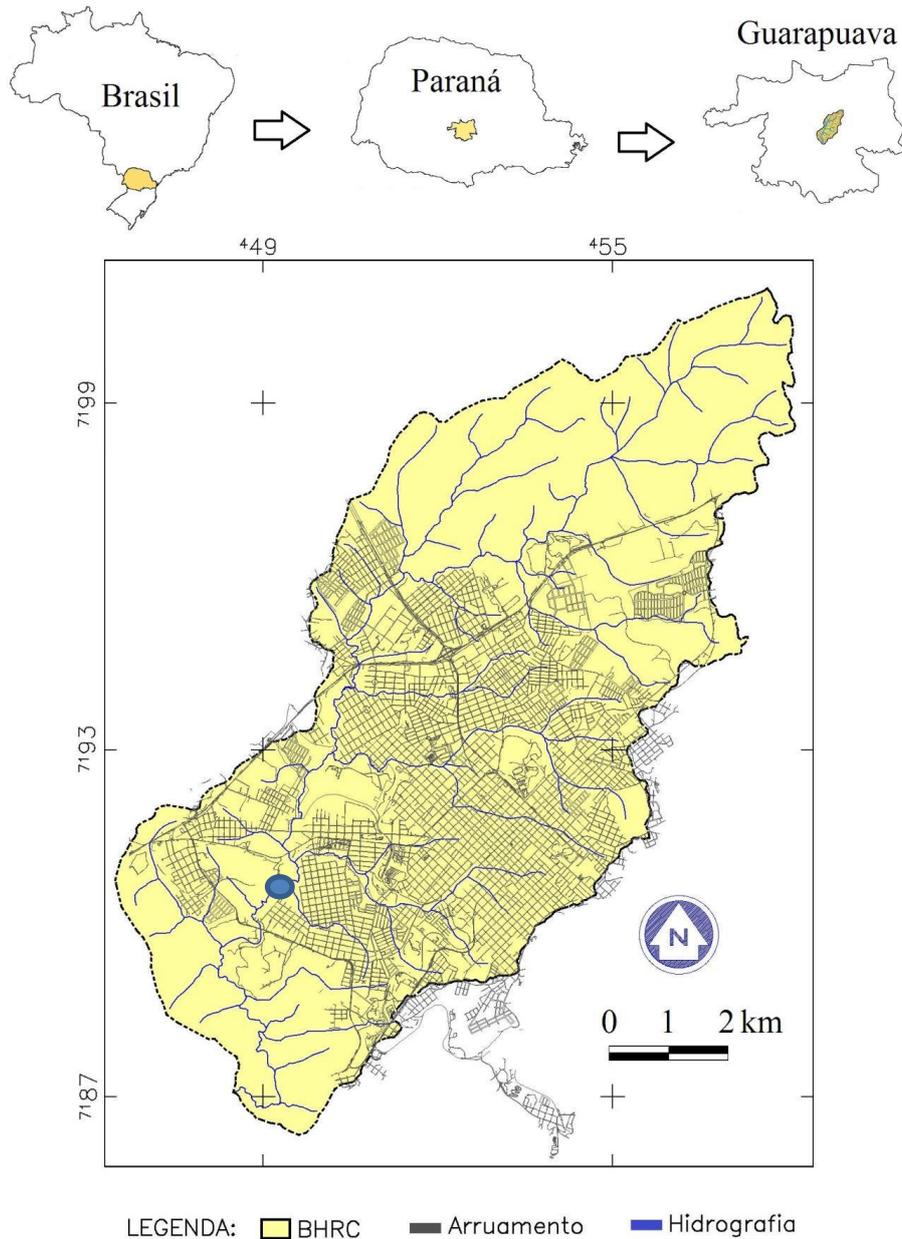


Figura 3-1 - Mapa de ubicación del sector de estudio, [Oliveira \(2011\)](#). En azul, aproximadamente, el punto de aforo de la cuenca.

El municipio de Guarapuava está ubicado en la región Centro Sur del estado de Paraná. La cuenca del Río Cascavel se sitúa en la porción central de este municipio, teniendo sus límites comprendidos entre los paralelos 25° 18' 20" y 25° 26' 27" Sur y los meridianos 51° 24' 52" y 51° 31' 56" Oeste.

El municipio, según los datos publicados por el Instituto Brasileño de Geografía y Estadística (IBGE), en 2018, cuenta con una población estimada de 180.334 habitantes ([IBGE, 2018](#)).

La cuenca del Rio Cascavel, tiene un área aproximada de 81 km², siendo tributaria de la cuenca del Rio Jordao, que a su vez es tributario del Rio Iguazú.

3.2. Aspectos históricos de ocupación de la localidad de Guarapuava

El área urbana de Guarapuava, se encuentra casi totalmente situada dentro de la cuenca del Rio Cascavel lo que hace que esta cuenca se encuentre aproximadamente en un 40 % urbanizada.

La ocupación de la región a lo largo de la historia obedeció a los intereses políticos-económicos pero también a las características fisiográficas del terreno (tipo de suelo, recursos hídricos, aspectos climáticos, entre otros). En ese contexto, el municipio de Guarapuava tuvo su nacimiento y desarrollo relacionado con el desenvolvimiento de la economía brasilera colonial, pasando a integrar los objetivos geopolíticos entre Portugal y España en los intereses de la exploración y explotación de los recursos naturales.

En un primer momento, Guarapuava tiene una ocupación relacionada al sistema de exportación de productos primarios basados en el extractivismo. La consolidación de su ocupación ocurre con la implementación de la economía ganadera en el Paraná.

A partir de la mitad del siglo XX, en la región existe un gran incremento poblacional debido a una mejora significativa de la economía nacional y por la integración de la ciudad a otros centros urbanos por medio del ferrocarril y las carreteras. Entre los períodos de 1950 a 1980 la población urbana presenta un crecimiento importante favorecido por un intenso flujo migratorio. En los años siguientes a ese período también hubo un gran crecimiento debido a los flujos migratorios provenientes del sector rural. Estos movimientos inmigratorios influenciaron de manera directa al núcleo urbano, favoreciendo el surgimiento de nuevos loteos en diferentes áreas periféricas. En este intervalo, a partir de 1960 es el momento del nacimiento de varios loteos con el fin de atender la demanda creciente de viviendas.

La ciudad de Guarapuava sufre una expansión territorial urbana importante a partir de la década de 1970, cuando surge un gran número de loteos. A partir de 1970, la población urbana crece significativamente, superando a la población rural al final de la década del '70, en cuanto a la población rural mantiene su tendencia de decaimiento la cual se acelera después de los años 1980 (Figura 3-2) ([Gomes y Vestena, 2018](#)).

Figura 3-2 - Evolución de la población en el Municipio de Guarapuava. Adaptado de [IBGE \(2011\)](#).

[Loboda \(2008\)](#), presentado por [Oliveira \(2011\)](#), menciona que este desarrollo urbano significativo se debe a los diversos cambios en la forma de apropiación de la naturaleza, como la introducción de nuevas técnicas de agricultura, las vías de transporte, las relaciones sociales y de trabajo, tanto en el campo como en la ciudad, que transformaron significativamente su paisaje. Sin embargo, a pesar del crecimiento de la ciudad, ésta presentó un desarrollo insuficiente con relación a la infraestructura urbana, sin la debida atención en cuanto a las normas y al uso de suelo.

3.3. Geomorfología de la cuenca

La cuenca del Rio Cascavel se encuentra insertada en la meseta de Guarapuava, que es caracterizado por los grandes derrames del vulcanismo mesozoico, constituidos por la formación Sierra Geral del Grupo San Bento. La formación Sierra Geral, está formada por amplios derrames de rocas ígneas, predominando los basaltos, que recubren rocas sedimentarias de la Formación Botucatu.

Las rocas basálticas de la formación Sierra Geral de la Cuenca del Rio Cascavel tienen como característica una coloración gris oscuro a negro, de composición básica a intermedia con una tendencia alcalina. Poseen una granulación media, estando compuestas por plagioclasios, agüita, minerales opacos, pigeonita, filosilicatos finos, apatita, cuarzo, carbonas y piroxenio alcalino.

Además de las áreas dominadas por las rocas de origen volcánico, en los fondos de los valles de la cuenca, asociados a las planicies de inundación, ocurren también sedimentos aluvionales. Estos se encuentran compuestos predominantemente por turbas y sedimentos enriquecidos con significativa cantidad de materia orgánica ([MINEROPAR, 1992, 2001](#), citado por [Oliveira, 2011](#)).

Siguiendo la clasificación geométrica de las redes de drenaje propuesta por [Sugiuo y Bigarella \(1990\)](#), la cuenca del Río Cascavel presenta la característica de tener una red de drenaje dendrítico o arborescente. Esta composición del drenaje se debe primeramente al desarrollo de dos canales sobre rocas (basalto) con resistencia uniforme, que condiciona el padrón arborescente. La red de drenaje de la cuenca también tiene su configuración influenciada por el control estructural, principalmente por la falla del Río Cascavel. Esta falla condiciona una configuración asimétrica de la red de drenaje, con mayor desarrollo en los tributarios de la margen izquierda de la cuenca.

Además de la falla principal del Río Cascavel son comunes también otras lineaciones estructurales representadas por fracturamientos verticales y horizontales constituyendo los fallos secundarios, que condicionan cierto paralelismo en algunos tributarios del Río Cascavel ([MINEROPAR, 1992](#)). Estas estructuras de relieve condicionan la presencia de significativas rupturas de declives, principalmente en el curso inferior del Río Cascavel donde se observan la presencia de corredera / cascadas.

A pesar de estos controles estructurales debidos a fallas presentes en la cuenca, existe una pendiente media del 6,4% constituyendo un relieve poco disecado, es decir, sin grandes procesos erosivos que resalten las estructuras principales. Observando la curva clínográfica de la Cuenca del Río Cascavel, se observa que se mantiene una ascendencia moderada de su pendiente, siendo que las pendientes superiores al 20% equivalen a menos del 6% del área total de la cuenca.

[Oliveira \(2011\)](#) define los principales aspectos fisiográficos de la cuenca (Tabla 3-1). Esta posee un relieve poco disecado con una pendiente mediana de 6,4 % (Figura 3-3) y una densidad de drenaje media de 1,54 km/km². El patrón de drenaje es de tipo dendrítico con alto grado de ramificación, condicionado por el substrato rocoso. La parte central de la cuenca en su mayor parte se encuentra ocupada por el área urbana de Guarapuava, que potencia las alteraciones en los procesos hidrológicos y consecuentemente la ocurrencia de inundaciones y anegamientos. Por los datos del trabajo, los autores concluyeron que la morfometría de la Cuenca del Río Cascavel restringe áreas a la ocupación humana, principalmente en las depresiones y llanuras de inundaciones en la porción central de la cuenca.

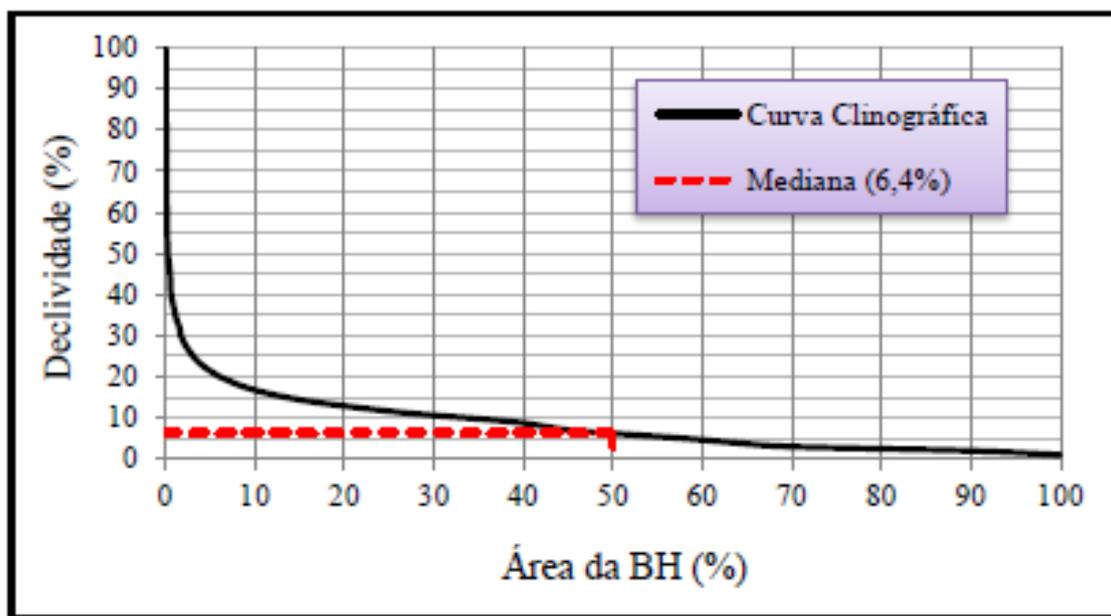


Figura 3-3 - Curva clinográfica de la cuenca del Río Cascavel (Oliveira, 2011).

Tabla 3-1 - Características principales de la Cuenca del Río Cascavel. Adaptada de Oliveira (2011).

Índice	Valores	Unidad
Área	81,03	Km ²
Perímetro	44,72	Km
Largo total de cursos fluviales	124,84	Km
Densidad de drenaje	1,54	Km/km ²
Longitud del río principal	24,4	Km
Pendiente del canal principal	10,0	m/km
Amplitud topográfica	256,0	m
Densidad de ríos	1,0	Km ²
Altitud media	1048,0	m
Altitud mediana	1070,0	m
Pendiente mediana	6,4	%
Coefficiente de compacidad	1,40	Adimensional
Factor de forma	0,30	Adimensional

3.4. Aspectos edafológicos

Los aspectos edafológicos resultan de los procesos intempéricos que actúan sobre un determinado material de origen, aliados a otros condicionantes como el clima, la vegetación, el suelo, el relieve y el tiempo. En la cuenca del Río Cascavel, los diversos procesos naturales de meteorización del sustrato rocoso condicionaron los siguientes tipos de suelo: suelos orgánicos (Organossolos), Latossolos Brunos y Litossolos (Figura 3-4).

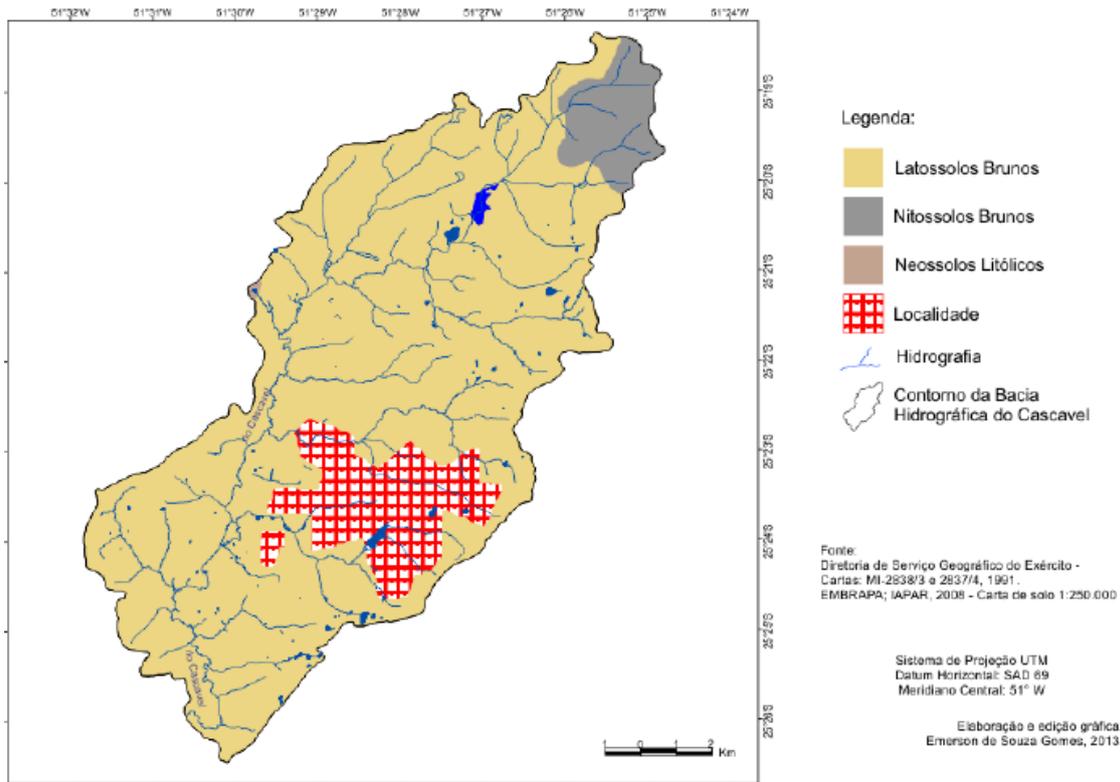


Figura 3-4 - Mapa de tipo de suelo de la cuenca del Río Cascavel (Gomes, 2014).

Los Organossolos predominan junto a las áreas de várzeas (bosques en llanuras de inundación) de los fondos de los valles de la cuenca, asociados a las planicies de inundación del Río Cascavel donde existen la presencia de sedimentos aluvionales. La formación de estos sedimentos está relacionada con la deposición de restos vegetales en grado variable de descomposición, acumulados en ambientes acuosos que se caracterizan por presentar alta plasticidad, olor peculiar y color oscuro. El material de origen se compone de acumulaciones orgánicas residuales recientes (Holoceno), cuya composición está relacionada con factores como: tipo de la formación vegetal, acciones biológicas procesadas y la proporción de sedimentos finos añadidos al material. Este tipo de suelo es denominado turba, y dependiendo de las condicionantes que en él actuaron, puede presentar variaciones de turbas arcillosas, arcillas orgánicas y arcillas turfosas. Los suelos orgánicos son bastante ácidos, debido a su desarrollo en condiciones de permanente encharcamiento, con el nivel de base en la superficie o cerca de ella durante la mayor parte del año. La vegetación que predomina en los suelos orgánicos son campos de várzeas, con la presencia de gramíneas, ciperáceas y arbustos de pequeño porte. Son suelos que se asientan directamente sobre el sustrato rocoso presentando espesores que varían de 0,5 a 3,0 m. de profundidad, pudiendo en algunos lugares presentar espesores superiores.

Los Latossolos Brunos son suelos que predominan en las partes aplanadas de los divisores topográficos ya lo largo de las vertientes más suaves / onduladas y alargadas encontradas normalmente entre 800 y 1200 m. Su génesis está relacionada con los procesos de intemperismo de las rocas ígneas ácidas preexistentes. Se refiere a suelos

MODELACIÓN HIDROLÓGICA-HIDRÁULICA TOTALMENTE DISTRIBUIDA DE UNA CUENCA FUERTEMENTE ANTROPIZADA – CASO DEL RÍO CASCAVEL (GUARAPUAVA/PR, BRASIL)

minerales no hidromórficos, con arcilla de baja capacidad de intercambio de cationes. Se presenta la secuencia de horizontes A, B y C, siendo que la transición de A y B es normalmente gradual. El horizonte A es generalmente poco desarrollado, con una coloración marrón-amarronada, y espesores entre 0,2 y 1,1 m. El horizonte B se compone de suelo residual rojizo de matriz arcillosa, con comportamiento plástico y comprensible. Su espesor varía de 1,0 a 6,0 m. Por otra parte, el horizonte C representa un estrato con niveles de rocas altamente descompuestas con características heterogéneas (suelos saprólios) ([MINEROPAR, 1992](#)).

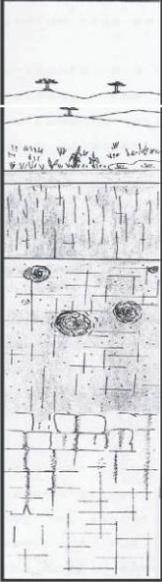
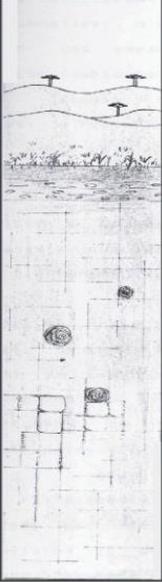
	Lattosolos Brunos	
		Suelos orgánicos
		Horizonte A: zona de lixivixación, con aspecto terroso, poroso y permeable. Espesor: 0,20 m a 1,00 m
		Horizonte B: zona de precipitación. Suelo arcilloso. Espesor: 1,00 m a 6,00 m
		Horizonte C: Roca muy descompuesta.
	Litossolos	
		Horizonte A: zona de lixivixación, con aspecto terroso, poroso y permeable. Espesor: 0,20 a 0,40 m
		Litossolo: poco espeso, pedregoso, poroso y permeable. Espesor: 0,20 m a 1,0 m.
		Horizonte C: Roca muy descompuesta.

Figura 3-5 - Perfil edafológicos de los suelos predominantes de la cuenca del Río Cascavel. Adaptado de [MINEROPAR, 1992 y Oliveira \(2011\)](#).

Los litosoles predominan en las porciones más empinadas del relieve, con pendientes superiores al 20% siendo también encontrados en relieves más suaves. Así como los Latossolos, los suelos Litólicos se originan de la meteorización del sustrato magmático. Sin embargo, comprenden suelos minerales, poco desarrollados

edafológicamente, con espesores de un máximo de 1,0 m. Sus características morfológicas se resumen prácticamente al horizonte A que presenta espesores entre 0,2 y 0,4 m, ocurriendo debajo de ese nivel capas inconsolidadas con porcentajes elevados de fragmentos y bloques.

3.5. Aspectos climáticos

El clima es un agente dinámico siendo compleja su caracterización. El mismo, está condicionado a una variedad de factores como la altitud, la continentalidad, la vegetación, la latitud y las masas de aire actuantes en la región entre otros factores. Con respecto a los aspectos climáticos de Guarapuava, están condicionados significativamente por su posición geográfica. El municipio se sitúa en el centro-sur del Estado de Paraná, siendo esta región área de actuación de los sistemas extratropicales que condiciona climas subtropicales. Por lo tanto, el área de estudio está bajo dominio de la zona extratropical, favorable a temperaturas con carácter mesotérmico, que se trata de promedios anuales entre 16 y 20 °C, con veranos amenizados por las altitudes e inviernos fríos. En cuanto a los regímenes pluviométricos estos son abundantes y distribuidos a lo largo del año, no aparentando períodos secos.

[Maack \(1981\)](#) definió la región de Guarapuava como perteneciente a la Zona de Clima cálido subtropical, fresco hasta frío en invierno, con una temperatura media anual de 16,8 °C y precipitación anual de 1.653,7 mm con vientos predominantemente en la dirección este.

De acuerdo con el IAPAR (Instituto Agronómico de Paraná), considerando la clasificación climática de Köppen, el clima de Guarapuava es del tipo Cfb - Clima templado propiamente dicho; con temperaturas medias en el mes más frío por debajo de 18°C (mesotérmico), veranos frescos y temperaturas medias en el mes más caliente por debajo de 22° C, sin estación seca. En la región de Guarapuava se tienen precipitaciones medias comprendidas entre 1.800 y 2.000 mm ([Caviglione, et al., 2000](#)) (Figura 3-6).



Figura 3-6 - Clasificación climática del Estado de Paraná. [Caviglione et al \(2000\)](#), presentado por [Oliveira \(2011\)](#).

Con respecto a la estacionalidad, las lluvias predominan en los meses de diciembre, enero y febrero, con precipitaciones entre 500 y 600 mm. Las medias térmicas anuales están entre 16°C y 17°C, variando de 11°C a 12°C en el invierno y de 22°C y 23°C en el verano. La humedad relativa media anual se sitúa entre el 75 y el 80% y la evaporación entre 900 y 1.000 mm ([Caviglione, et al 2000](#)).

En la clasificación de Köppen el tipo climático "Cfb" corresponde a clima templado, lluvioso y veranos moderadamente calientes ([Ayoade, 1986](#)).

En la Figura 3-7 se tiene la temperatura y la pluviosidad media mensual del período de 1976 a 2009, con base en los datos de la Estación Agrometeorológica de Guarapuava-PR. En el período la temperatura media anual de Guarapuava fue de 17,1°C y la pluviosidad media anual de 1.923 mm.

En Guarapuava, en el estado de Paraná donde se localiza el área de estudio del presente trabajo, las precipitaciones debido a dos factores estáticos del clima como ser la posición geográfica (paralelo de referencia 25° 21'S) y su altitud medida (1.120 m), sumado a la actuación de las masas de aire polar atlántico, tropical atlántico, tropical continental y ecuatorial continental, ocurren todo el año, con mayor volumen en el trimestre de Verano y menor en Invierno. Las lluvias convectivas son más comunes en el período más caluroso, y en otros períodos del año ocurren con mayor frecuencias lluvias frontales.

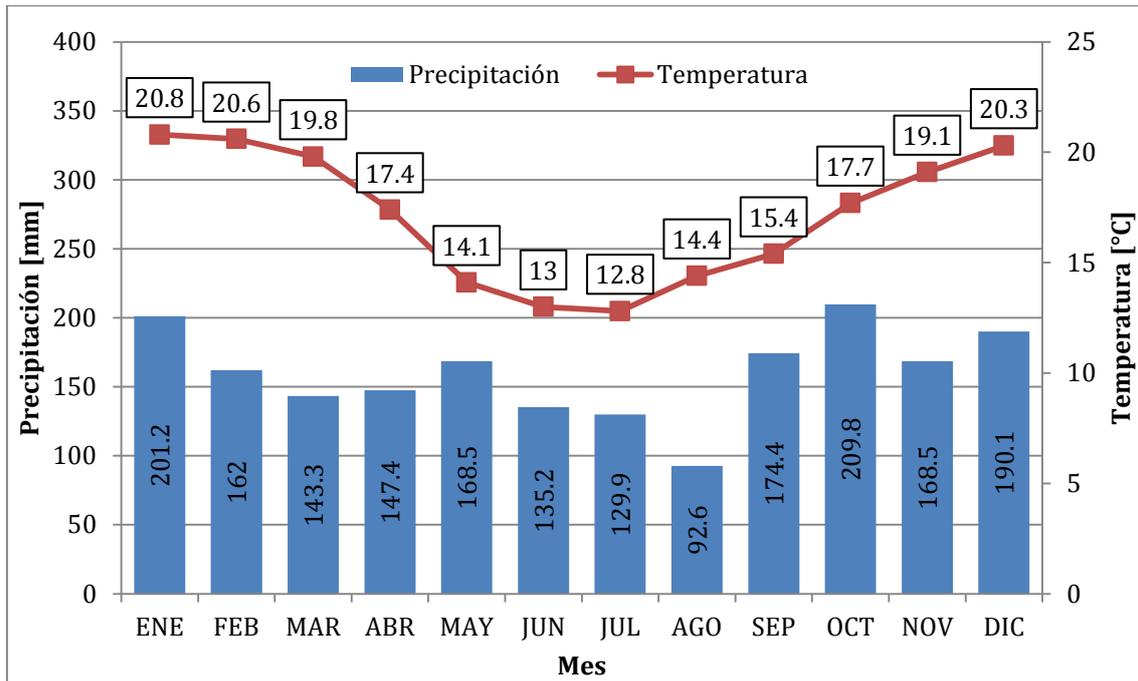


Figura 3-7 - Precipitaciones y temperaturas medias en el Municipio de Guarapuava. Datos: [IAPAR \(2011\)](#). Adaptado de [Oliveira \(2011\)](#).

3.6. Uso del suelo

Los aspectos de la vegetación en la Cuenca del Río Cascavel están íntimamente ligados a las transformaciones que ocurrieron en el período Cuaternario y más recientemente por las acciones antrópicas, siendo que el revestimiento vegetal en el área, no siempre fue como se presenta actualmente. Durante el período Cuaternario ocurrieron varias oscilaciones climáticas que favorecieron profundos cambios en las formaciones florísticas de la región sur de Brasil. [Bigarella et al. \(1994\)](#) mencionan que anterior al último episodio glacial pleistocénico, los paleoambientes del sur de Brasil eran bien similares a los actuales. Con la disminución de la temperatura y el consiguiente avance de la glaciación, el carácter tropical de los climas regionales se desintegró influyendo en cambios de sus condiciones físicas. Los niveles marinos bajaron hasta cien metros menos que su nivel medio actual. Las temperaturas medias globales disminuyeron de 3 a 4 °C amortiguando el nivel de calor de las tierras bajas intertropicales haciendo mucho más frío el ambiente de las regiones subtropicales y templadas.

Estos cambios climáticos favorecieron la regresión de los bosques y la disminución de la pluviosidad en la región sur de Brasil. También hubo incremento de las formaciones vegetales abiertas intertropicales y subtropicales, en virtud de la expansión compartimentada de los climas secos estacionales, influenciado por la progresión de las corrientes frías en latitudes bajas ([Bigarella et al., 1994](#)).

[Maack \(1981\)](#) apunta que durante los episodios de semi-aridez, los bosques quedaron restringidos a refugios donde las condiciones ambientales permitían su desarrollo. Pero lo que predominaba eran los campos limpios y cerrados que cubrían gran

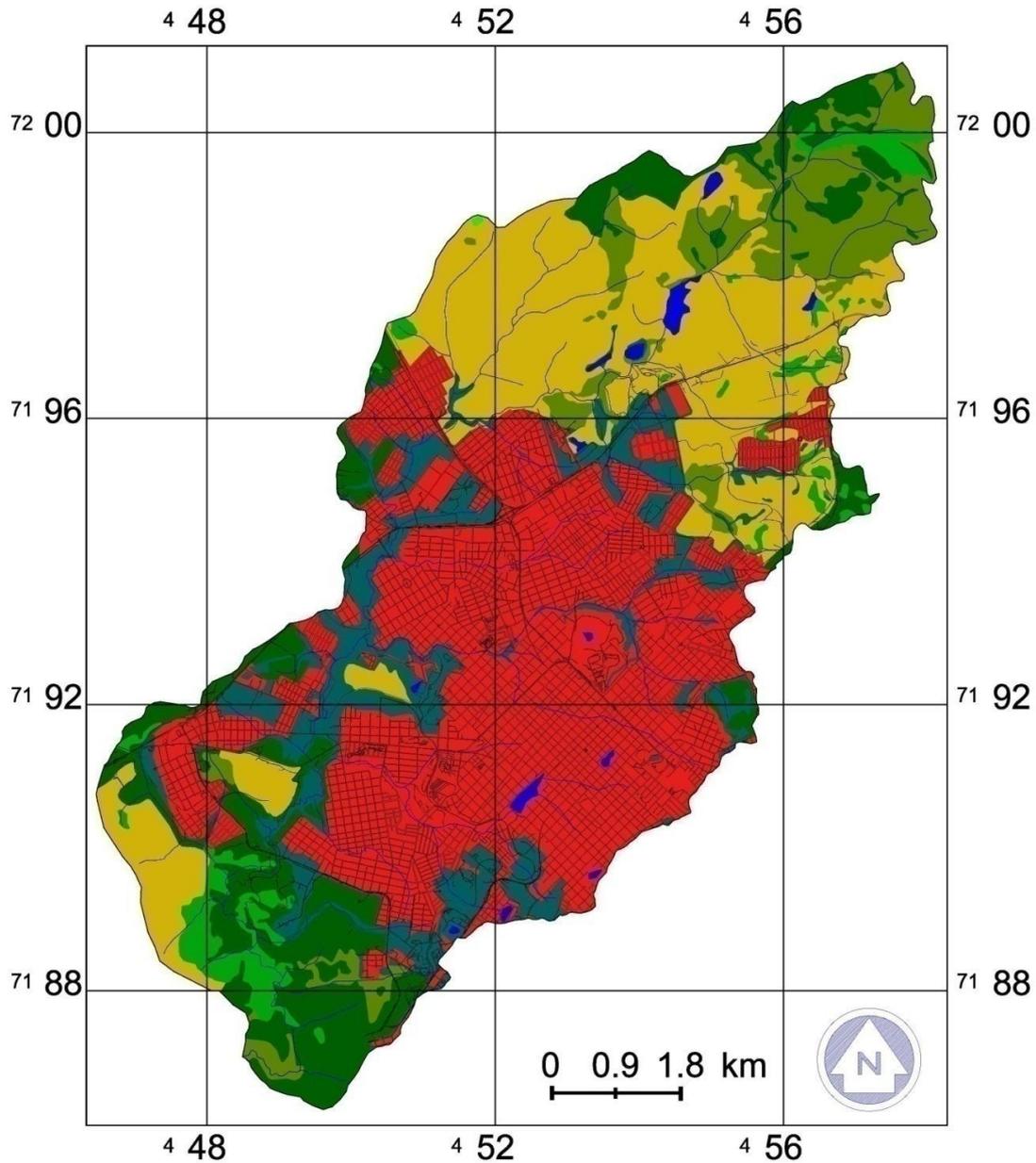
MODELACIÓN HIDROLÓGICA-HIDRÁULICA TOTALMENTE DISTRIBUIDA DE UNA CUENCA FUERTEMENTE ANTROPIZADA – CASO DEL RÍO CASCAVEL (GUARAPUAVA/PR, BRASIL)

parte del Estado de Paraná con una vegetación de un clima alternante semiárido y semihúmedo. Los restos de ese clima pretérito son visibles actualmente como las manchas de cerrado y campos abiertos existentes en el territorio paranaense. Con el aumento medio de la temperatura y de la humedad en la región durante el Cuaternario reciente, las precipitaciones se volvieron más abundantes en el sur de Brasil, propiciando el dominio de las matas en el Estado de Paraná haciendo de esa región una de las más ricas en bosques de Brasil hasta hace pocas décadas. Esta configuración florística, según [Maack \(1981\)](#) se desarrolló solamente a partir del Pleistoceno.

El autor caracterizó la región florística de Guarapuava, como un paisaje compuesto por la asociación de campos limpios (Estepa-gramínea-leñosa); capones y bosques de galería con bosques de araucarias (Bosque Ombrófilo Mixto) estrechamente ligado a la altitud. [Ab`Saber \(2003\)](#) estableció una caracterización más amplia sobre la vegetación de la región, al dividir Brasil en Dominios Morfoclimáticos, incluyendo los campos y las selvas de araucaria bajo dominio de las mesetas subtropicales con araucarias. Para [Bigarella et al. \(1994\)](#), la región de dominio de las mesetas de araucaria comprende un área con cerca de 400.000 km², distinguido por un clima subtropical húmedo, con invierno relativamente suave sujeto a heladas y eventuales nevadas. Las mesetas de las araucarias poseen altitudes variadas superiores a 500 m, normalmente entre 700 y 1.200 m. Por lo tanto, la región de Guarapuava tiene sus aspectos florísticos caracterizados principalmente por vegetaciones de las selvas con araucaria, y tres ambientes de campos distintos que son: campos abiertos; los campos empapados y los capones.

La vegetación actual de la región de Guarapuava, no está relacionada solamente con las oscilaciones paleoclimáticas, sino también con las acciones antrópicas a partir principalmente de la segunda mitad del siglo XX. A partir de ese período, las matas fueron derribadas de manera intensa en función de intereses económicos contribuyendo a una significativa retracción de los escasos fragmentos de bosques de la región. Los famosos campos de Guarapuava dieron lugar a los monocultivos de soja y maíz. En el siglo XX, el Estado de Paraná, tenía cerca del 83,4% de su territorio cubierto por bosques, y actualmente sólo poco más del 5% perduran como remanentes ([Bigarella et al., 1994](#)).

La Cuenca del Rio Cascavel presenta una vegetación en etapa avanzada de alteración, siendo pocos los restos de la selva nativa. En el área quedan sólo pequeñas manchas dispersas de mata secundaria en el bajo y alto curso de la cuenca, además de pequeñas concentraciones de mata ciliar a lo largo de los Ríos Cascavel y Xarquinho. La mayor parte de la cuenca está ocupada por el área urbana de Guarapuava, por cultivos temporales, pastos y áreas de reforestación, lagos y áreas de várzeas. La Figura 3-8 presenta los tipos de uso de la tierra que predominan en la Cuenca.



LEGENDA

	Área de Várzeas	4,00 km ²	5,00%		Floresta Explorada Estágio Inicial	11,83km ²	14,59%
	Agropecuária	21,08 km ²	26,01%		Floresta Explorada Estágio Médio	2,9km ²	3,58%
	Lagos	0,52 km ²	0,64%		Floresta Explorada Estágio Avançado	8,4km ²	10,26%
	Rios				Reflorestamento	0,05km ²	0,061%
	Arruamento				Áreas Urbanas	32,25km ²	40,21%

Figura 3-8 - Uso de suelos en la cuenca del Rio Cascavel (Oliveira, 2011).

Capítulo 4: Metodología del trabajo.

En este capítulo, se presenta la metodología a utilizar para realizar la modelación hidrológico-hidráulica totalmente distribuida de una cuenca fuertemente antropizada (con un sector ocupado por el área urbana de la localidad de Guarapuava).

En primer lugar, teniendo en cuenta las particularidades de los modelos seleccionados (TREX y SWMM), se evaluaron los mismos para su utilización en conjunto y de forma complementaria para obtener una simulación totalmente distribuida en un sector netamente urbano.

Luego, se presentan las modificaciones que se realizaron al código fuente de TREX para que el mismo posibilite la modelación del caudal captado por las bocas de tormenta existentes en las áreas urbanas y como debe ser ingresado los datos para realizar dicha modelación.

Seguido a ello, se explica paso a paso el procedimiento para realizar la modelación conjunta con TREX previamente modificado y SWMM para modelar la cuenca en estudio, y en particular los elementos del sector urbano.

Finalmente, se presenta la aplicación de TREX modificado y SWMM a un pequeño sector urbanizado de la cuenca del Río Cascavel.

4.1. Modelación de área urbana con TREX y SWMM. Comparación de resultados

El objetivo de dicha modelación preliminar fue el análisis del funcionamiento de TREX y SWMM en una cuenca con características urbanas, pero bajo condiciones más simples que las presentadas en la Cuenca del Río Cascavel. Teniendo en cuenta además, que SWMM, a pesar de considerarse un modelo semidistribuido, es el modelo hidrológico-hidráulico más difundido en ámbitos urbanos.

Este ejemplo consiste en una pequeña cuenca urbana, la misma está basada en un proyecto de sistematización de escurrimientos superficiales urbanos de un barrio real, se trata del Barrio General Roca de la ciudad de Villa María, Provincia de Córdoba, Argentina (Figura 4-1).

Por lo tanto, se generó un modelo en TREX para representar la escorrentía superficial del barrio (sin tener en cuenta conductos) y con las mismas consideraciones se efectuó un modelo en SWMM.

Para ambos modelos, los datos de elevación (cotas o modelo digital de elevación) se generaron tomando como referencias las cotas de proyectos de los cordones cuneta y los puntos bajos donde se colocarían las bocas de tormentas.

Para ambos modelos, tomando como referencia la imagen satelital se determinaron las áreas impermeables de la zona (viviendas, calles, etc.). Esto se realizó, con la digitalización manual de la imagen satelital identificando aquellos sectores correspondientes a viviendas, calles, etc., con ayuda también del conocimiento y la visita

en el sector. De esta forma, se determinaron las áreas impermeables de cada cuenca en SWMM y se crearon de forma manual los mapas raster de tipo y uso de suelo para utilizar en TREN. De todo lo anterior, se estableció una cuenca teórica de 0,145 km², compuesta de 13 manzanas regulares de 90 m x 90 m, 2 manzanas irregulares y calles de 10 m de ancho. La cuenca cuenta con 4 puntos de descarga, en los cuales actúan como sumidero, es decir, todo volumen de agua que llega al sector sale del modelo (Figura 4-2). En el ejercicio de modelación se sumaran los resultados del punto 1 y 2.



Figura 4-1 - Vista satelital de Barrio General Roca - En azul ferrocarril

En el modelo TREN se utilizaron los puntos de nivel del proyecto para elaborar el Modelo Digital de Elevación (MDE), al mismo, se le realizó una sobreelevación de 15 cm a las manzanas para tener en cuenta el desnivel con respecto a las calles y una sobreelevación de 2 m a los sectores correspondientes de viviendas. Con ayuda de imágenes satelitales se realizaron los mapas de tipo de suelo y uso de suelo. Se utilizó el modelo con 3 puntos de descarga (outlets) que se encuentran dentro del dominio. La resolución de la modelación fue de celdas de 5 m de lado. En este modelo, se orientó de manera tal que las calles se encuentren de forma vertical y horizontal solamente, es decir, sin tener en cuenta la orientación del barrio y sus componentes.

En el modelo SWMM se delimitaron 104 subcuencas, a las cuales se les definió los parámetros del modelo como: ancho, área, pendiente, punto de descarga, área permeable, flujo entre áreas, parámetros de infiltración y rugosidad. Se definieron los 3 puntos de descarga. A ambos modelos se les aplicó la misma precipitación teórica.

En TREN, como se mencionó anteriormente, el modelo de infiltración utilizado es el de Green y Ampt, por lo que en SWMM se utilizó el mismo modelo, con parámetros

MODELACIÓN HIDROLÓGICA-HIDRÁULICA TOTALMENTE DISTRIBUIDA DE UNA CUENCA FUERTEMENTE ANTROPIZADA – CASO DEL RÍO CASCAVEL (GUARAPUAVA/PR, BRASIL)

similares. De la misma forma se utilizaron parámetros similares en las variables que comparten ambos modelos, como rugosidad de la cuenca (n de Manning) e intercepción vegetal y/o almacenamiento (Figura 4-3).



Figura 4-2 - Vista general de proyecto de cordón cuneta del barrio. En amarillo la ubicación de las bocas de tormenta proyectadas.

Es importante destacar, teniendo la misma base de datos, la rapidez y facilidad con que se elaboran los datos de ingreso para el modelo TREX en comparación con el modelo SWMM. Adicionalmente, SWMM presenta la dificultad de que se debe establecer las relaciones hidrológicas entre las áreas permeables e impermeables, es decir la forma en que estas interactúan y si están conectadas o no entre sí. En cambio, en TREX esto no es necesario establecer y la relación entre ellas dependerá de las diferencias de nivel de las celdas correspondientes que se ven afectadas por el distinto uso de suelo y de la consecuente dirección y sentido de escurrimiento que generan dichas diferencias de nivel entre celdas. El porcentaje de área impermeable en SWMM de cada subcuenca se calculó con ayuda del GIS GRASS y se consideró que las áreas permeables e impermeables de las mismas descargan de manera independiente al punto de volcamiento (opción: outlet).

En SWMM las calles fueron modeladas como subcuencas considerándose totalmente impermeables. Tanto éstas, como las correspondientes al amanzanamiento, descargan a un único conducto de sección triangular (que simula el par de cunetas paralelas al tramo de la calle) y éstos a su vez descargan a bocas de tormenta. En TREX se modela la cuenca completa con la opción de sólo simular celdas, es decir, sin simular canales.

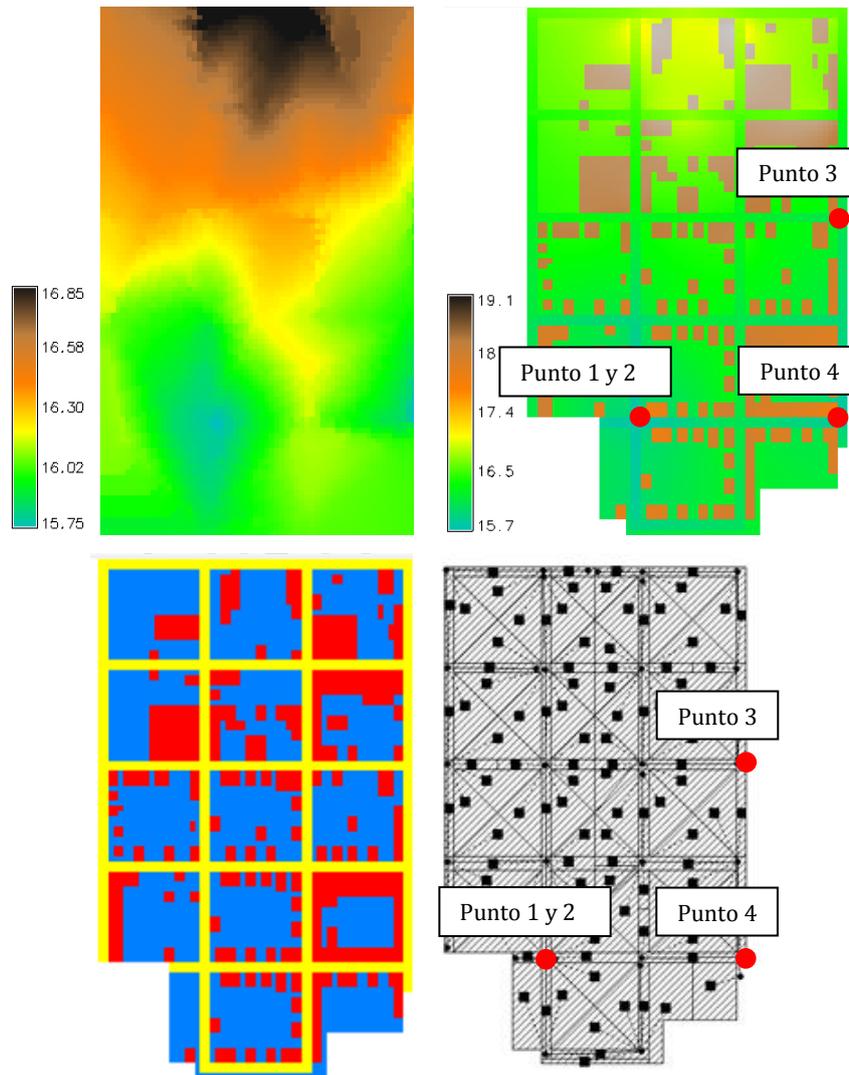


Figura 4-3 - Mapas utilizados en el modelo TREX y modelo SWMM. Arriba a la izquierda el Modelo digital de elevaciones sin modificaciones. Arriba a la derecha el modelo digital de elevaciones utilizado en TREX con sobreelevación de construcciones y descenso de cota a las celdas correspondientes a las calles. Abajo a la izquierda mapa de uso de suelo utilizado en TREX. Abajo a la derecha modelo utilizado en SWMM.

Luego de realizar los modelos, a ambos se les aplicó la misma lluvia hipotética. Ésta, fue una lluvia uniforme en toda la cuenca con una duración de 10 horas y una intensidad constante de 25 mm/hora.

Al comparar los resultados de ambas modelaciones se encontró que la diferencia entre los caudales picos modelados con TREX y SWMM alcanza un 5 %. Se observa que esta variación depende principalmente de las relaciones de áreas impermeables que se definen en SWMM. Lo mismo ocurre entre los volúmenes escurridos al modelar con TREX y SWMM. Se observa también que la forma del hidrograma (es decir la respuesta de la cuenca) son similares en ambos softwares (Figura 4-4).

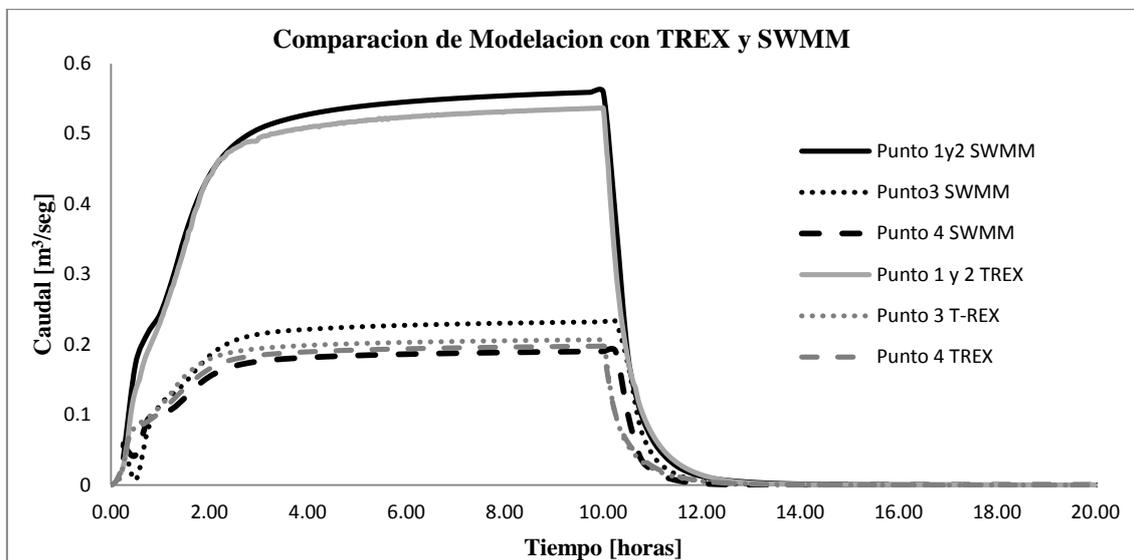


Figura 4-4 - Comparación de modelación con TREX y SWMM.

4.2. Modificación de código fuente de TREX

Al llevar a cabo el anterior trabajo se confirmó lo siguiente:

- La facilidad para cargar los datos de tipo y uso de suelo en un modelo como TREX al utilizar datos ráster.
- En ambos casos deben ser procesados los datos del MDE. En TREX se deben modificar en los sectores donde se encuentran las calles y las construcciones. En SWMM se deben crear subcuencas a partir del MDE, que para lograr el grado de detalle logrado en TREX (resolución de 5 m x 5 m), se necesita un mayor procesamiento del mismo.
- En TREX no es posible la modelación de conductos (que no pudo ser aplicado en el trabajo anterior).
- En el trabajo se simulaban las bocas de tormenta como sumideros donde todo el caudal pasante ingresa en ellas. Esto, por la imposibilidad en TREX de simular las bocas de tormenta. Ya que lo que modela TREX son “salidas de cuenca”, incluso estas salidas deben estar en el “perímetro” del dominio de cálculo debido a su estructura de cálculo. Estando dentro del dominio de cálculo se pueden generar errores en los resultados.
- A pesar que en el ejemplo no fue tenido en cuenta, aplicar una precipitación con una distribución espacialmente distribuida es mucho más complejo en SWMM. En TREX esto se realiza fácilmente a

través de la interpolación de estaciones pluviográficas, incorporación de datos radar, etc.

Por lo anterior, se decidió utilizar a TREX para la simulación de la transformación de precipitación-escorrentía superficial. SWMM se utilizará para la simulación de los flujos hidráulicos en conductos, canales abiertos, cerrados y lagunas de retención.

Para combinar dichos modelos, fue necesaria la modificación del código fuente en TREX para que este modelo pueda simular el funcionamiento de las bocas de tormenta.

En primer lugar, se trató de modificar la rutina de escurrimiento superficial, de forma tal de agregar y modificar las características de los outlets/salidas del modelo para que estas simulen las condiciones hidráulicas de bocas de tormentas de distintas características. Sin embargo, al realizar pruebas del modelo en mediana y gran escala se producían inestabilidades numéricas lo que hizo imposible su implementación. Lo anterior realizado se confirma en la bibliografía existente del modelo Multi-hydro ([Giangola-Murzyn, 2013](#)).

En la segunda opción, y que resultó la opción adoptada, se agregaron rutinas y se modificaron las existentes en el módulo de infiltración del programa.

La idea de la modificación del módulo de infiltración, fue que existan celdas cuyo tipo de suelo represente una boca de tormenta. Por ende, este tipo de suelo reservado a cada tipo de boca de tormenta estará relacionado con una ecuación o fórmula que represente el comportamiento hidráulico de la boca de tormenta a modelar.

De esta forma, se modificó el código fuente de manera tal que los primeros seis tipos de suelo están reservado para distintos tipos de bocas de tormenta y los restantes tipos de suelo tienen la rutina de cálculo original de TREX, es decir el cálculo de la infiltración por el modelo de Green-Ampt.

La Tabla 4-1 explicita los seis tipos de bocas de tormenta posibles de calcular con el código modificado. Tomando como clasificación la realizada en el libro de [Riccardi \(2004\)](#) en donde divide las bocas de tormenta en verticales en cordón, horizontal y combinada (Figura 4-5). Estos tres tipos pueden ser a la vez en punto intermedio o en un punto bajo.

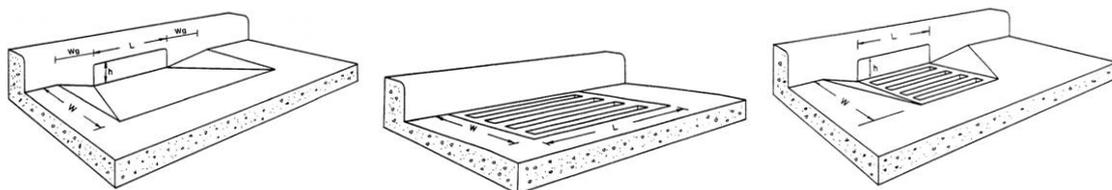


Figura 4-5 - Imágenes de los distintos tipos de boca de tormenta. De izquierda a derecha, boca de tormenta vertical en cordón, horizontal y combinada.

Lo que lleva lo anterior, es que en el código fuente modificado, los primeros seis tipos de suelo están reservados para las bocas de tormenta. Es decir, en el archivo de ingreso, para describir los parámetros de un tipo de suelo (que no sea una boca de

MODELACIÓN HIDROLÓGICA-HIDRÁULICA TOTALMENTE DISTRIBUIDA DE UNA CUENCA FUERTEMENTE ANTROPIZADA – CASO DEL RÍO CASCAVEL (GUARAPUAVA/PR, BRASIL)

tormenta) se debe iniciar con el tipo de suelo número 7, independientemente de que existan o no bocas de tormenta en la cuenca a modelar.

Las formulaciones fueron agregadas de forma tal de diferenciar en cada tipo de boca de tormenta si la misma se encuentra en un punto bajo (es decir, la elevación de la celda de la boca de tormenta es menor a la elevación de las celdas adyacentes) o se encuentra en un punto medio (hay celdas adyacentes de menor elevación a la celda perteneciente a la boca de tormenta), para de esta manera poder determinar el funcionamiento de la boca de tormenta y si existe o no caudal pasante.

Tabla 4-1 - Tipo de Suelos reservados para bocas de tormenta.

Tipo de Suelo	Tipo de boca de tormenta
1	Vertical 1
2	Vertical 2
3	Horizontal 1
4	Horizontal 2
5	Combinada 1
6	Combinada 2

Por otro lado, se utilizan las variables auxiliares tradicionales de TREX para definir los tipos de suelo para representar características de las bocas de tormenta (Tabla 4-2).

Tabla 4-2 - Variables utilizadas en TREX modificado para modelar bocas de tormentas.

Tipo de Boca de Tormenta	Conductividad Hidráulica K_h	Altura de Succión	Déficit de humedad
Vertical	Longitud [m]	No se tiene en cuenta	No se tiene en cuenta
Horizontal	Área útil de la abertura horizontal	Perímetro vertedor de la reja	No se tiene en cuenta
Combinada	Área útil de la abertura horizontal	Perímetro vertedor de la reja	Longitud de la boca vertical

Las ecuaciones incorporadas para cada boca de tormenta son las siguientes:

Boca de tormenta vertical, en punto intermedio

Se utilizó la fórmula empírica de Guo (1997), presentada en [Riccardi \(2004\)](#) en la cual se determina la longitud teórica de la boca:

$$L_t = 0.817 * Q_0^{0.42} * S_l^{0.3} * \left(\frac{1}{n S_e}\right)^{0.6} \quad (4-1)$$

Donde L_t es la longitud teórica requerida, Q_0 el caudal circulando por la cuneta y a interceptar en su totalidad, S_l la pendiente longitudinal de la calle, n el coeficiente de resistencia de Manning y S_e la pendiente transversal en la cuneta de la boca.

Luego, se determina el caudal captado por la boca de tormenta, teniendo en cuenta la longitud real de la boca de tormenta, el cual se calcula de la siguiente manera:

$$Q_i = Q_0 \left[1 - \left(\frac{L_c}{L_t}\right)^{1.8} \right] \quad (4-2)$$

Donde Q_i es el caudal teórico a interceptar y L_c la longitud propuesta de la abertura del cordón. No se aplicó ningún factor de reducción al caudal teórico a interceptar.

Cada una de las variables, en el código fuente modificado, se determina de la siguiente manera:

- Q_0 : se calcula el caudal total que llega a la celda en donde se encuentra la boca de tormenta, pudiendo ser una a tres celdas las que aportan caudal a la boca de tormenta. Por lo que se evalúan las elevaciones de las 4 celdas adyacentes a la de la boca de tormenta y se calcula cual de ella genera escurrimiento hacia la celda de la boca de tormenta. Se suman los caudales que llegan a la boca de tormenta. En este punto, se crean cuatro variables auxiliares que almacenan los caudales que pueden provenir de las 4 direcciones distintas.

- S_i : se comparan las elevaciones de las cuatro celdas adyacentes a la boca de tormenta y se almacena la pendiente máxima "positiva" es decir la pendiente con la dirección correspondiente al escurrimiento del caudal pasante desde la celda donde se encuentra la boca de tormenta hacia las adyacentes.

- n : Coeficiente de rugosidad de Manning se fija en 0,013.

- S_e : la pendiente transversal se fija en 3 %.

Luego de determinar lo anterior se procede a calcular las longitudes teóricas y el caudal insumido con las formulaciones mencionadas. El caudal insumido será "infiltrado" en el modelo y el pasante seguirá escurriendo según la rutina tradicional de TREX para el escurrimiento superficial.

Boca de tormenta vertical, en punto bajo

En este caso, se utilizó las ecuaciones presentadas por Bertoni et al (1995), citadas por [Riccardi \(2004\)](#) donde se diferencia entre el funcionamiento entre vertedero y orificio.

Se toma la relación para las bocas **sin depresión** ya que son las existentes en la Ciudad de Guarapuava, ciudad que se encuentra en la cuenca de estudio.

Estas relaciones están en función de la longitud de la boca de tormenta L_c , el tirante de agua y_0 y la altura de boca de tormenta h_b . En las ecuaciones siguientes se encuentran estas relaciones.

$$Q_i = 1,656 L_c y_0^{1.5} \quad (y_0 \leq 1.5 h_b) \quad (4-3)$$

$$Q_i = 0,67 L_c h_b [2 g (y_0 - h_b/2)]^{1/2} \quad (y_0 > 1.5 h_b) \quad (4-4)$$

Se tomó como vano de la abertura de boca de tormenta un valor fijo. Se tomó un vano (h_b) de 15 cm.

Luego se tuvo en cuenta que la altura de agua calculada en TREX es la de la celda (de 5 m por 5 m) por lo que hay que realizar una transformación para equipararla a la altura de agua en el cordón.

MODELACIÓN HIDROLÓGICA-HIDRÁULICA TOTALMENTE DISTRIBUIDA DE UNA CUENCA FUERTEMENTE ANTROPIZADA – CASO DEL RÍO CASCAVEL (GUARAPUAVA/PR, BRASIL)

Se realizó la Tabla 4-3 (en Anexo) para establecer una relación, tomando una pendiente longitudinal de 1 % aproximadamente un promedio de la existente en la ciudad de Guarapuava.

Tabla 4-3 - Determinación del $h_{\text{cordón}}$ en función del tamaño de las celdas.

h_{celda} [m]	Ancho [m]	Área [m ²]	S_i [m/m]	n [ad]	P Mojado [m]	Rh [m]	Velocidad [m/s]	Caudal [m ³ /s]	$h_{\text{cordón}}$ [m]
0	5	0	0,01	0,013	5	0	0,000	0,000	0,000
0,01	5	0,05	0,01	0,013	5	0,01	0,357	0,018	0,034
0,02	5	0,1	0,01	0,013	5	0,02	0,567	0,057	0,053
0,03	5	0,15	0,01	0,013	5	0,03	0,743	0,111	0,068
0,04	5	0,2	0,01	0,013	5	0,04	0,900	0,180	0,081
0,05	5	0,25	0,01	0,013	5	0,05	1,044	0,261	0,094
0,06	5	0,3	0,01	0,013	5	0,06	1,179	0,354	0,105
0,07	5	0,35	0,01	0,013	5	0,07	1,307	0,457	0,116
0,08	5	0,4	0,01	0,013	5	0,08	1,428	0,571	0,126
0,09	5	0,45	0,01	0,013	5	0,09	1,545	0,695	0,135
0,1	5	0,5	0,01	0,013	5	0,1	1,657	0,829	0,144
0,11	5	0,55	0,01	0,013	5	0,11	1,766	0,971	0,153
0,12	5	0,6	0,01	0,013	5	0,12	1,871	1,123	0,162
0,13	5	0,65	0,01	0,013	5	0,13	1,974	1,283	0,170
0,14	5	0,7	0,01	0,013	5	0,14	2,074	1,452	0,178
0,15	5	0,75	0,01	0,013	5	0,15	2,172	1,629	0,186
0,16	5	0,8	0,01	0,013	5	0,16	2,267	1,814	0,194
0,17	5	0,85	0,01	0,013	5	0,17	2,361	2,007	0,201
0,18	5	0,9	0,01	0,013	5	0,18	2,452	2,207	0,209
0,19	5	0,95	0,01	0,013	5	0,19	2,542	2,415	0,216
0,2	5	1	0,01	0,013	5	0,2	2,631	2,631	0,223
0,21	5	1,05	0,01	0,013	5	0,21	2,718	2,854	0,230
0,22	5	1,1	0,01	0,013	5	0,22	2,803	3,084	0,236
0,23	5	1,15	0,01	0,013	5	0,23	2,888	3,321	0,243
0,24	5	1,2	0,01	0,013	5	0,24	2,971	3,565	0,250
0,25	5	1,25	0,01	0,013	5	0,25	3,053	3,816	0,256
0,26	5	1,3	0,01	0,013	5	0,26	3,134	4,074	0,262
0,27	5	1,35	0,01	0,013	5	0,27	3,213	4,338	0,269
0,28	5	1,4	0,01	0,013	5	0,28	3,292	4,609	0,275
0,29	5	1,45	0,01	0,013	5	0,29	3,370	4,887	0,281
0,3	5	1,5	0,01	0,013	5	0,3	3,447	5,171	0,287
0,31	5	1,55	0,01	0,013	5	0,31	3,523	5,461	0,293
0,32	5	1,6	0,01	0,013	5	0,32	3,599	5,758	0,299
0,33	5	1,65	0,01	0,013	5	0,33	3,673	6,061	0,305
0,34	5	1,7	0,01	0,013	5	0,34	3,747	6,370	0,310
0,35	5	1,75	0,01	0,013	5	0,35	3,820	6,686	0,316

Para determinar la altura del cordón se utilizaron las formulaciones de la bibliografía ([Riccardi, 2004](#)) tal la ecuación:

$$Q = 0,375 \frac{1}{n} z y_0^{8/3} S_l^{1/2} \quad (4-5)$$

Donde y_0 es la altura del tirante de agua en el cordón, S_l la pendiente longitudinal y n el factor de rugosidad de Manning.

De lo anterior, se estableció la siguiente relación entre la altura del cordón y la altura de la celda (Figura 4-6):

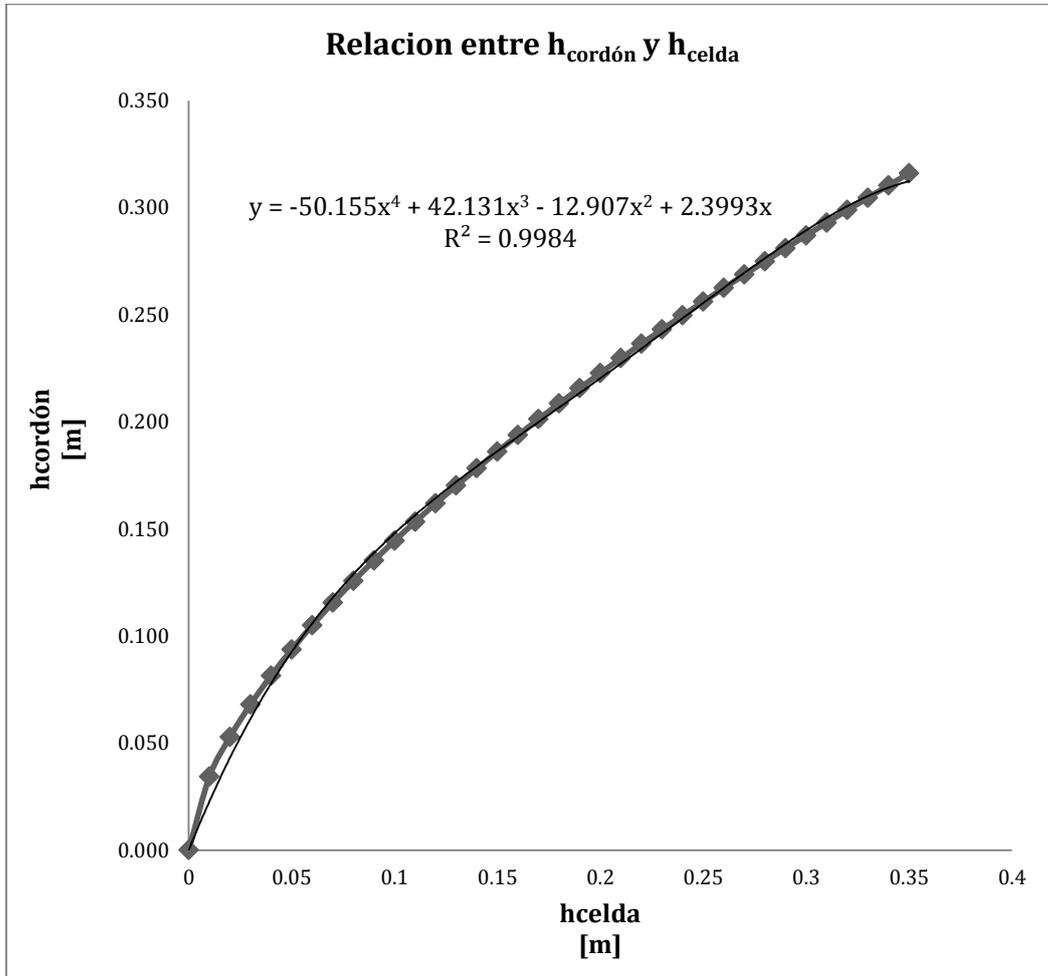


Figura 4-6 - Relación entre h_{celda} y $h_{\text{cordón}}$.

De esa forma, paso a paso se compara si la altura del escurrimiento en el cordón es menor o mayor a $1,5 h_b$ (altura del cordón). Como h_b se fijó en 0,15 m, se compara si la y_0 es menor o mayor a 0,225 m para decidir si la boca de tormenta trabaja como orificio o como vertedero. Por último dependiendo el funcionamiento de la boca de tormenta infiltrará mayor o menor cantidad de agua por la boca.

Boca de tormenta horizontal, en punto intermedio

En este caso se utilizó, para representar el funcionamiento hidráulico de una boca de tormenta horizontal en un punto intermedio, la ecuación de Neenah presentada por [Riccardi \(2004\)](#), en la cual plantea el caudal a interceptar de la siguiente manera:

$$Q_i = 0,205 K y^{5/3} \quad (4-6)$$

Donde Q_i es el caudal captado por la boca de tormenta, y el tirante de agua sobre la reja y K un coeficiente empírico que depende de la pendiente longitudinal S_l , la pendiente transversal S_e y del tipo de reja.

El mismo autor, presenta para una reja de 0,90 m de largo x 0,45 m de ancho, la variación de K para pendientes longitudinales entre 1% y 6 % y pendientes transversales variando entre 0% y 6 % (Figura 4-7).

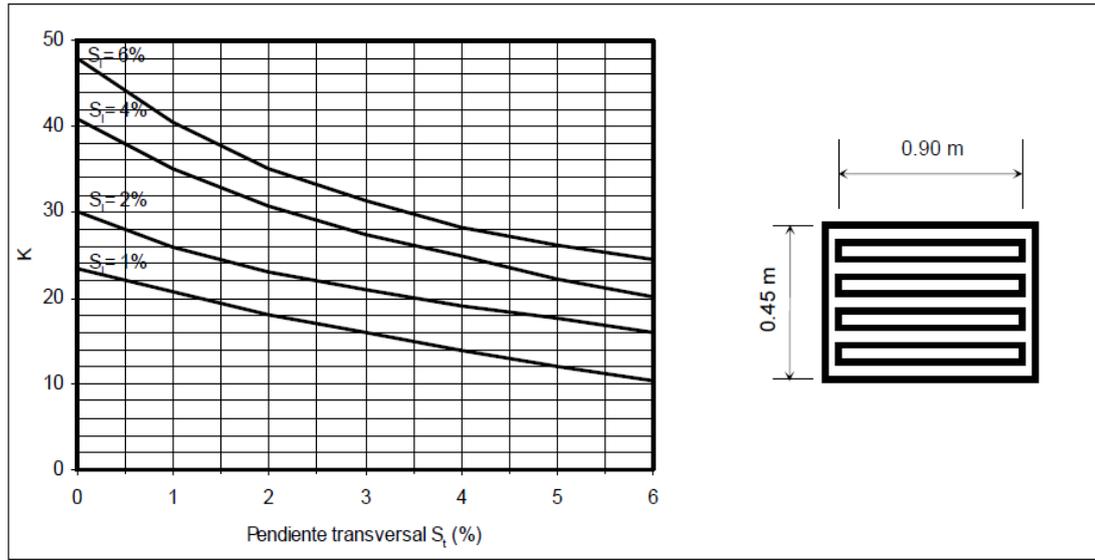


Figura 4-7 - Coeficiente empírico de ecuación de Neenah, presentada por Riccardi (2004).

Fijando una pendiente transversal del 2 % para todas las calles, se determinó una relación para relacionar K directamente con la pendiente longitudinal, teniendo en cuenta que las bocas de tormenta de la ciudad de Guarapuava tienen aproximadamente las mismas dimensiones.

Tabla 4-4 - Factor adimensional K dependiendo S_l , fijando $S_e = 2$ %.

S_l	K
0.01	18
0.02	23
0.04	31
0.06	35

De esta forma, se encontró la relación que se encuentra en la Figura 4-8.

Por lo tanto, de misma manera que en la boca de tormenta vertical, en primer lugar se determina el caudal que llega a la celda de la boca de tormenta, luego se calcula el y_0 , se determina el coeficiente K en relación a la pendiente longitudinal y por último el caudal captado por la boca de tormenta.

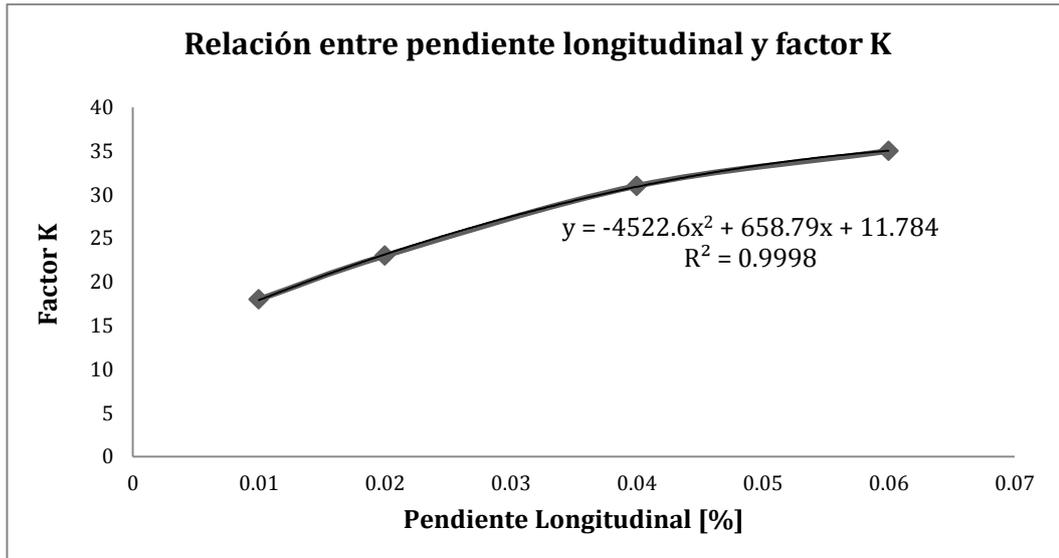


Figura 4-8 - Relación entre el factor adimensional K y la pendiente longitudinal.

Boca de tormenta horizontal, en punto bajo

Si según la elevación de las celdas adyacentes a la celda donde existe la boca de tormenta se determina que ésta se encuentra en un punto bajo, se calcula la boca de tormenta horizontal según la ecuación presentada por Bertoni, descrita por [Riccardi \(2004\)](#).

En este caso, se utiliza una característica de la reja que se define como perímetro vertedor de la reja P_R que puede ser estimado por:

$$P_R = 2[a_1 + a_2 - t_b(n_a - 1)] \quad (4-7)$$

Donde a_1 y a_2 son las dimensiones internas de la reja, n_a es el número de aberturas y t_b es el espesor de los barrotes.

Por otro lado, el área útil A_u de la abertura horizontal se define como:

$$A_u = n_a a_1 e \quad (4-8)$$

Donde e es el espesor de la abertura entre barrotes.

De la misma forma que en la boca de tormenta vertical en punto bajo, dependiendo la altura del tirante de agua la boca de tormenta va a funcionar como vertedero o como orificio.

Por lo tanto si y_0 es menor o igual a 1,792. (A_u/P_R) la boca de tormenta tiende a trabajar como vertedero y la relación para determinar el caudal captado por la boca es la siguiente:

$$\frac{Q_i}{P_R} = 1.656 y^{1.5} \quad (4-9)$$

Donde Q_i es el caudal captado por la boca de tormenta, e y es el tirante de agua sobre la reja.

En cambio, si y_0 es mayor a 1,792 (A_u/P_R) la boca de tormenta tiende a trabajar como orificio y la relación que representa dicho funcionamiento es la siguiente:

$$\frac{Q_i}{A_u} = 2.91 y^{0.5} \quad (4-10)$$

En este caso, de la misma forma que en las demás bocas de tormenta se calcula el tirante de agua en el cordón según la relación que se presenta en la Figura 4-6 y luego se calcula el caudal captado.

Cabe aclarar que las variables A_u y P_R son ingresadas por el usuario como dos características de las bocas de tormenta horizontales.

Boca de tormenta combinada, en punto intermedio o punto bajo

Para las bocas de tormentas mixtas, las ecuaciones a utilizar son las descriptas precedentemente (ecuaciones 4-2, 4-3, 4-4, 4-6, 4-9 y 4-10) para bocas de tormenta horizontal y vertical.

El procedimiento de cálculo para este tipo de bocas es el siguiente:

En primer lugar, se calcula el caudal que puede interceptar la reja, dependiendo si se trata de una reja en punto intermedio o punto bajo. Si el caudal que llega a la boca de tormenta es mayor al caudal captado por ella, es decir, existe un caudal pasante, con este caudal se procede a calcular el caudal captado por la boca de tormenta vertical. Es decir, con el caudal excedente se determina la longitud teórica de la boca y luego el caudal captado por ella dependiendo la longitud de la boca de tormenta vertical ingresada por el usuario.

En la Figura 4-9 se presenta un gráfico resumen del procedimiento de cálculo para cada tipo de boca de tormenta.

En el Anexo I se encuentra el código fuente modificado.

**MODELACIÓN HIDROLÓGICA-HIDRÁULICA TOTALMENTE DISTRIBUIDA DE UNA CUENCA FUERTEMENTE ANTROPIZADA – CASO DEL RÍO CASCAVEL
(GUARAPUAVA/PR, BRASIL)**

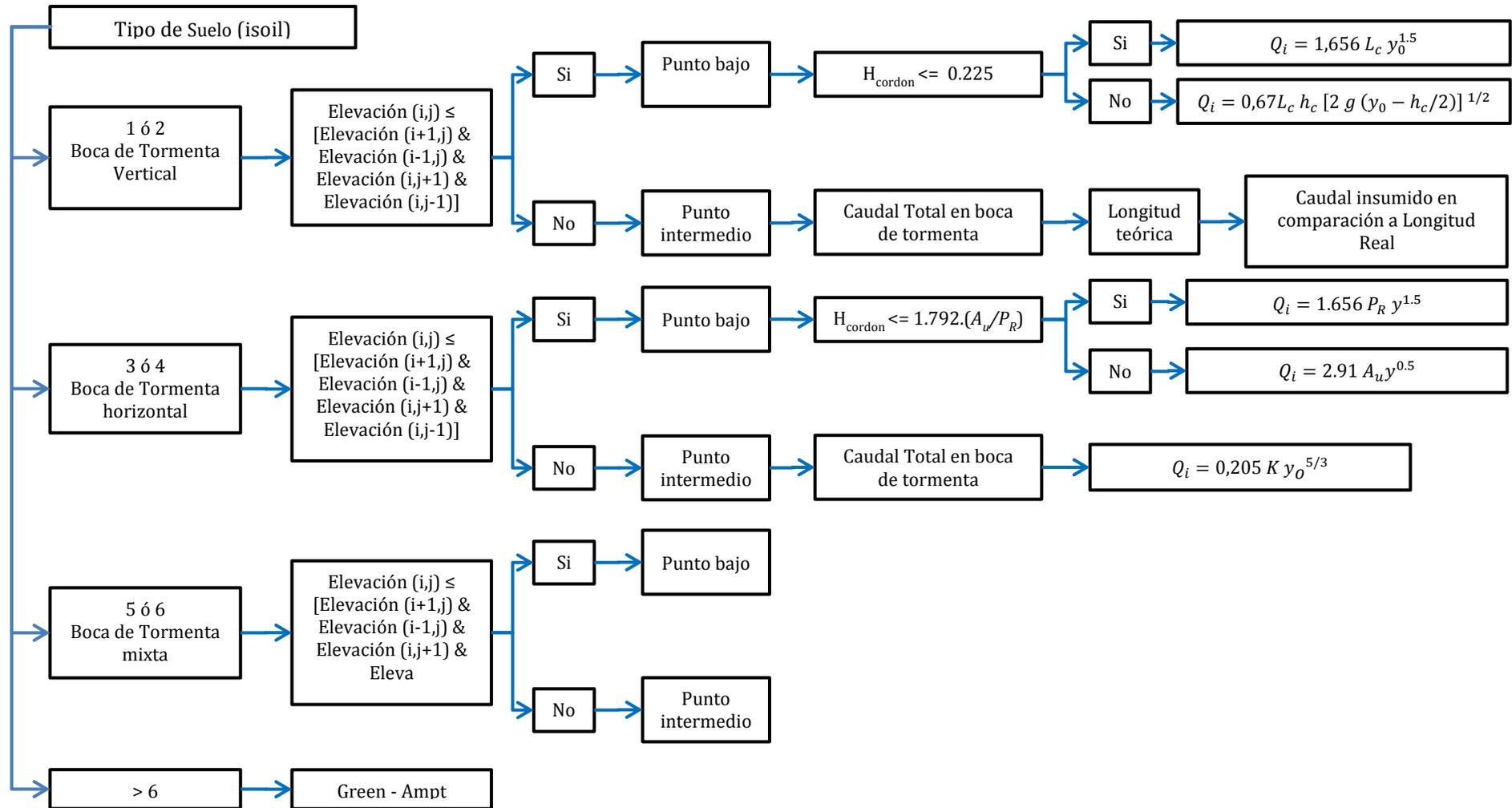


Figura 4-9 - Esquema de cambios realizados en el código fuente de TREX. Módulo infiltración.

4.2.1. Validación de las modificaciones realizadas

Para la validación de las modificaciones realizadas, se utilizaron ejemplos teóricos presentes en la bibliografía ([Mays, 2004](#)) y otros ejemplos sencillos fácilmente verificables con las ecuaciones antes descriptas.

El desarrollo de las verificaciones se encuentran en el Anexo II, y en la siguiente tabla (Tabla 4-5) se presenta un resumen de las mismas.

Tabla 4-5 - Comparación de cálculo teórico y cálculo en TREX de diferentes tipo de bocas de tormenta

Boca de tormenta vertical en punto intermedio.			
	Cálculo Teórico	Cálculo en TREX	Diferencia TREX con cálculo teórico
Caudal Captado	0,0399 m ³ /s	0,0404 m ³ /s	1,2 %
Caudal Pasante	0,0401 m ³ /s	0,03952 m ³ /s	1,4 %
Boca de tormenta vertical en punto bajo.			
	Cálculo Teórico	Cálculo en TREX	Diferencia TREX con cálculo teórico
Caudal Captado para tirante de agua de 0,104 m. (funcionamiento como vertedero)	0,187 m ³ /s	0,200 m ³ /s	7,0 %.
Caudal Captado para tirante de agua de 0,2408 m. (funcionamiento como vertedero)	0,650 m ³ /s	0,650 m ³ /s	0,0 %.
Boca de tormenta horizontal en punto intermedio.			
	Cálculo Teórico	Cálculo en TREX	Diferencia TREX con cálculo teórico
Caudal Captado.	0,018331 m ³ /s	0,020515 m ³ /s	11,9 %.
Caudal Pasante.	0,061669 m ³ /s	0,059485 m ³ /s	3,5 %.
Boca de tormenta horizontal en punto bajo.			
	Cálculo Teórico	Cálculo en TREX	Diferencia TREX con cálculo teórico
Caudal Captado para tirante de agua de 0,1326 m. (funcionamiento como vertedero)	0,0799 m ³ /s	0,080 m ³ /s	0,12 %.

Se puede observar diferencias mínimas entre lo calculado teóricamente y lo calculado en TREX luego de las modificaciones realizadas en el código fuente. Estas diferencias se consideran aceptables teniendo en cuenta las simplificaciones que se generaron al realizar las mencionadas modificaciones.

4.3. Procedimiento de modelación en conjunto con TREX modificado y SWMM para aplicar en una cuenca fuertemente antropizada con un sector urbanizado.

Como se mencionó anteriormente, con TREX se realiza la modelación de la transformación precipitación-escorrentía y luego el escurrimiento superficial producido en la cuenca y con SWMM se modelarán todos los conductos: ya sean cerrados o abiertos.

Sin embargo, los canales abiertos tienen el aporte del escurrimiento superficial de la cuenca (tanto el sector rural o urbanizado) y los canales cerrados el aporte puntual de las bocas de tormentas que captan el escurrimiento superficial provocado en las áreas urbanas. La salida del modelo TREX estará dada por los aportes de escurrimientos superficiales a los canales abiertos y los caudales captados por las bocas de tormenta (gracias a la modificación realizada del código fuente) y en SWMM estos serán los ingresos al sistema hidráulico.

Por lo tanto, el procedimiento de modelación conjunta con TREX y SWMM cuenta con los siguientes pasos:

1- Simulación en TREX de la transformación precipitación-escorrentía en la cuenca. Se tiene como ingreso la precipitación caída en la cuenca (precipitación distribuida utilizando la opción IDW de TREX), los mapas de elevación de la cuenca, mapas de uso de suelo, mapas de tipo de suelo, y características de cada uso y tipo de suelo. Se debe respetar las siguientes consideraciones:

a- En el mapa de tipo de suelo, se indican las bocas de tormenta con el tipo de suelo acorde al tipo de boca, según lo explicado precedentemente (Figura 4-10). En el archivo input del modelo se indican las características de cada tipo de boca de tormenta.

b- En el mapa de tipo de suelo, se indican en aquellas celdas que coinciden con los cauces abiertos (que captan los escurrimientos superficiales de la cuenca) con un tipo de suelo especial (Figura 4-10). Este tipo de suelo especial tendrá características de infiltración de forma tal que sea totalmente permeable. Es decir, todo lo que llega a estas celdas se infiltra por completo. Esto fue realizado de tal forma debido a los siguientes aspectos:

- En TREX es posible simular los cauces utilizando el módulo de cálculo de flujo en una dimensión de TREX, ingresando mapas adicionales con los segmentos y nodos de cauces (ver sección 2.2.4.3). Sin embargo, lo anterior, tiene la limitante que el ancho del cauce no puede superar el 80 % del lado de la celda. Como en este caso la resolución adoptada es de 5,0 metros para la zona urbana y en esta zona existían cauces con un ancho mayor a 4,0 metros se resolvió simular el flujo de los cauces en SWMM.
- Por lo anterior, en TREX no se utilizó el módulo de canales, sino que se modelaron a los mismos como parte del sistema de escurrimiento superficial pero con un tipo de suelo “especial” (mencionado anteriormente).

- Este tipo de suelo especial tiene la finalidad de captar los caudales que llegan a cada celda de la superficie que coincide con la ubicación de un cauce, es por ello que en estas celdas se adopta un tipo de suelo en el cual al momento de identificar sus características se indica un alto coeficiente de conductividad y un déficit de humedad nulo para que en esta celda todo el escurrimiento que llegue se infiltre.
- Luego, en SWMM existirá un “nodo cauce” coincidente con cada celda del modelo TREX donde existe un cauce. El término “nodo cauce” será utilizado en el presente informe para referirnos a aquellos nodos del modelo de SWMM que representan en TREX una celda de los cauces naturales. El ingreso de caudal de cada nodo cauce en el modelo SWMM será el caudal infiltrado en aquellas celdas identificadas del modelo TREX con un tipo de suelo especial cauce (Figura 4-11).

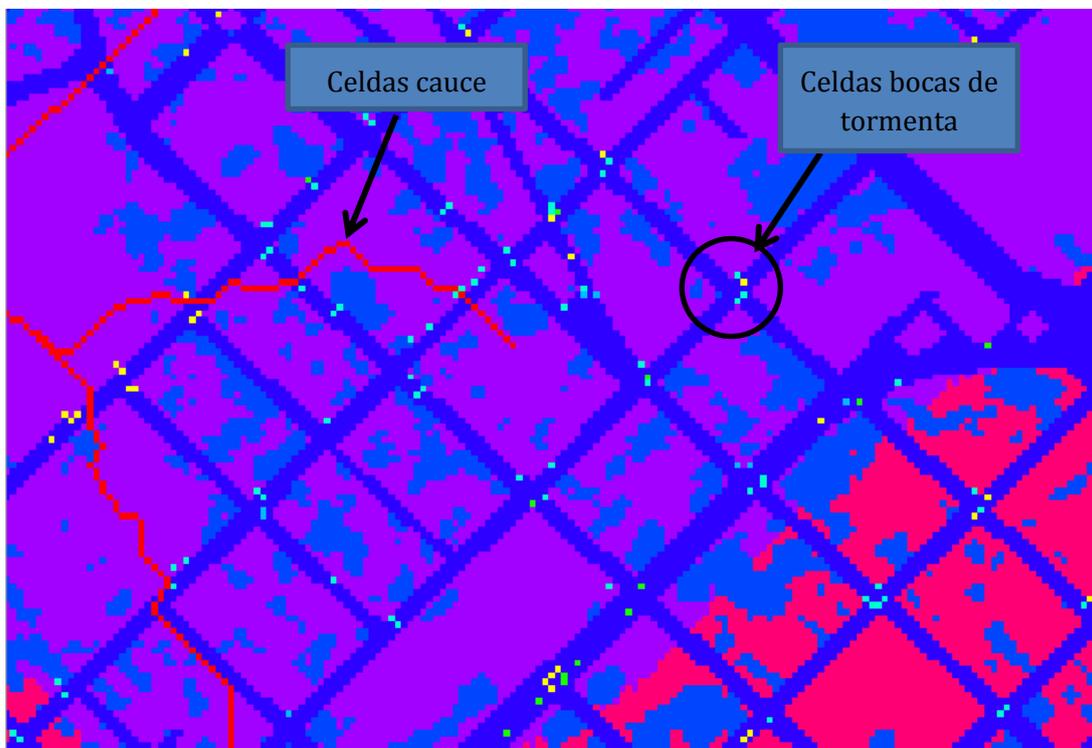


Figura 4-10 - Mapa de tipo de suelo a utilizar en TREX con agregado de bocas de tormenta.

MODELACIÓN HIDROLÓGICA-HIDRÁULICA TOTALMENTE DISTRIBUIDA DE UNA CUENCA FUERTEMENTE ANTROPIZADA – CASO DEL RÍO CASCAVEL
(GUARAPUAVA/PR, BRASIL)

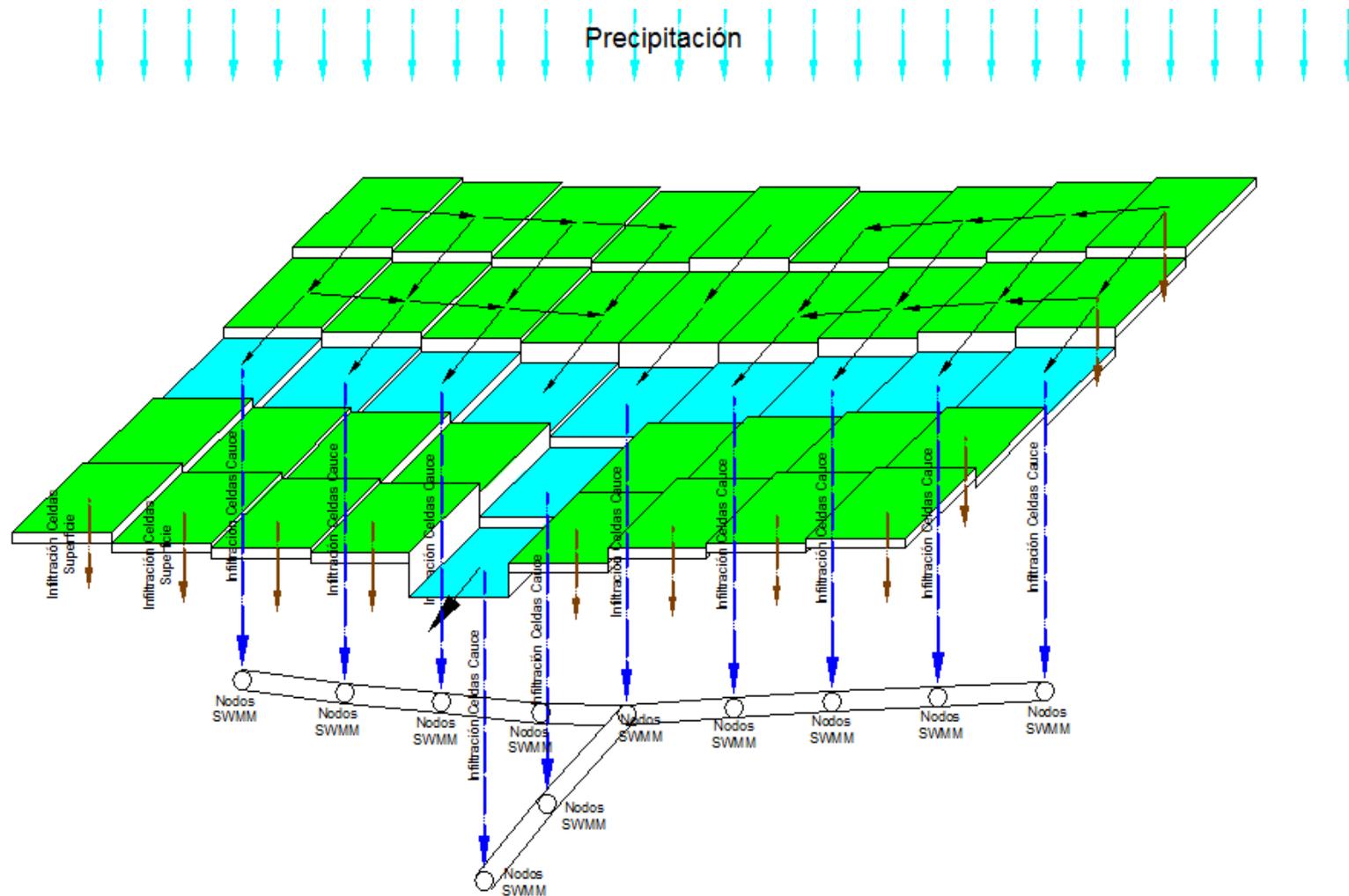


Figura 4-11 – Esquema del acoplamiento del modelo TREX y SWMM. En verde las celdas correspondiente al escurrimiento superficial en TREX, en celeste las celdas correspondientes a los cauces. En azul el caudal infiltrado en las celdas cauces que es ingresado a los nodos cauces de SWMM.

c- Por último, también en el mapa de tipo de suelo, se indican con un tipo especial aquellas celdas que coinciden con lagunas, lagos o sectores de regulación. Este tipo de suelo también será totalmente permeable. La suma del caudal infiltrado en cada laguna, lago o sector de regulación será el caudal de ingreso al elemento embalse del modelo SWMM. El procedimiento es similar al explicado para los nodos cauces.

d- Como se utilizarán los mapas de salida de velocidad de infiltración para extraer los caudales infiltrados en cada celda de boca de tormenta, cauce o laguna, se debe indicar en el archivo input que TREX cree como salida el mapa de altura de infiltración y que lo haga cada un paso de tiempo adecuado (por ejemplo cada 0,1 hora de simulación).

2- Se debe implementar el modelo SWMM donde existirá un nudo cauce y boca de tormenta en coincidencia con las celdas cauce y bocas de tormenta de TREX y luego los conductos que vinculan a cada uno de ellos. Las lagunas o lagos, se modelan con un embalse.

3- Luego de realizada la simulación en TREX, se deben extraer de los mapas de velocidad de infiltración los caudales infiltrados en cada celda. Para ello, se realizaron programas ad-hoc que utilizan el mapa de tipo de suelo para identificar cuáles son las celdas de boca de tormenta, cauces o lagunas. Se debe tener en cuenta para ello que el mapa es de velocidad de infiltración [mm/h] por lo que hay que transformarlo a caudal teniendo en cuenta el área de la celda. Por otro lado, se deben realizar las transformaciones adecuadas de unidades para ser ingresadas al modelo SWMM.

4- Después de extraer los caudales en TREX de cada celda boca de tormenta, cauce o laguna, se procede a la creación de las series de datos con el formato adecuado para SWMM y con los nombres y numeraciones utilizadas en SWMM. En el caso de lagunas o lagos, se suman todas las celdas que conforman cada lago, embalse o laguna y se crea una sola serie de datos para cada uno de ellos, ya que en SWMM estos elementos se modelan con el elemento embalse o reservorio.

5- Finalmente, se procede a la modelación de SWMM con los ingresos creados anteriormente (Figura 4-12 y Figura 4-13). Se obtienen así resultados distribuidos en toda la cuenca, ya sea de escurrimiento superficial, infiltración y precipitación caída que se puede obtener en el modelo TREX o los caudales y niveles escurridos en todos los canales (abiertos o cerrados) que se visualiza en el modelo SWMM.

MODELACIÓN HIDROLÓGICA-HIDRÁULICA TOTALMENTE DISTRIBUIDA DE UNA CUENCA FUERTEMENTE ANTROPIZADA – CASO DEL RÍO CASCAVEL (GUARAPUAVA/PR, BRASIL)

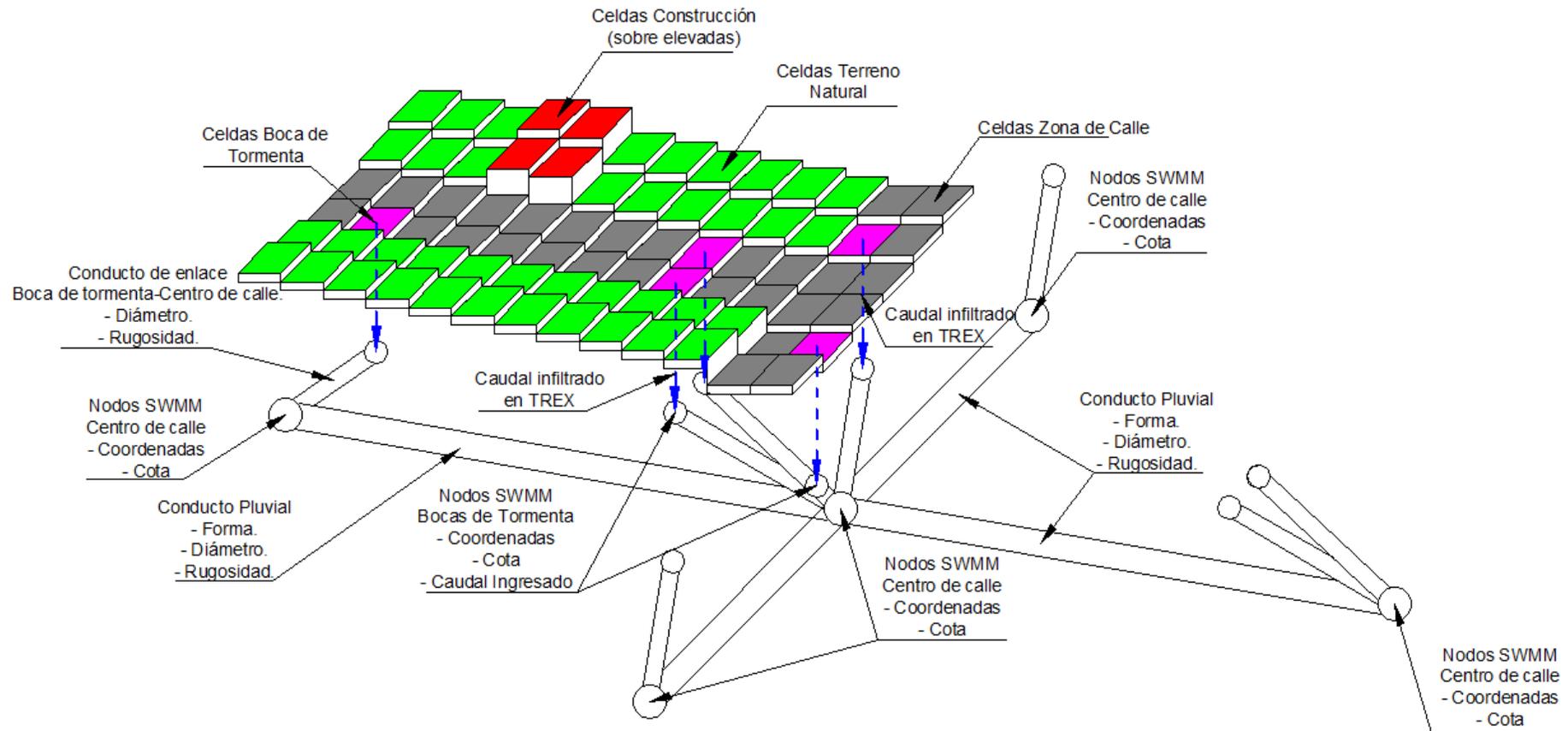


Figura 4-12 – Esquema básico de la relación entre el modelo TREX y SWMM en sector urbano. Transferencia de los caudales captados por las bocas de tormentas en el modelo SWMM.

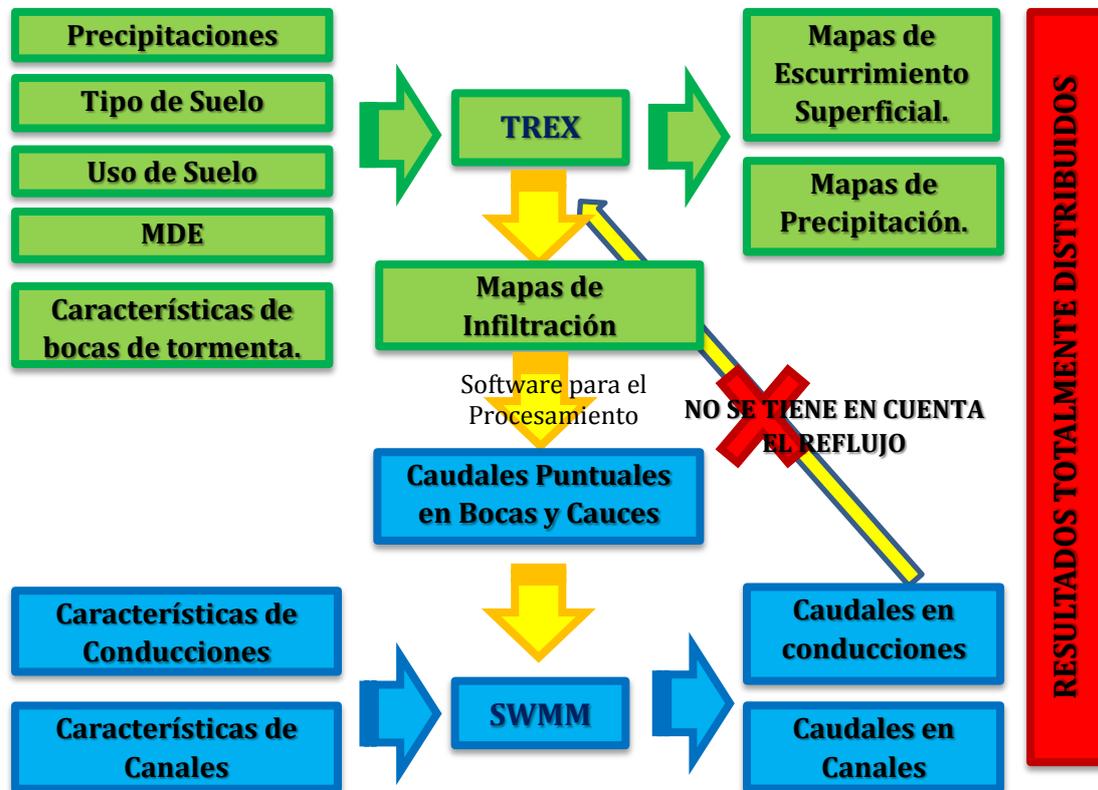


Figura 4-13 - Esquema del procedimiento de modelación con TREX y SWMM en conjunto.

4.3.1. Aplicación del procedimiento a una pequeña área urbana

Como primera aplicación del procedimiento antes descrito se presenta la modelación de un sector de la cuenca del Río Cascavel, en el estado de Paraná, Brasil. Este sector, pertenece a la cuenca de estudio del trabajo, por lo que se presenta con más detalle la ubicación, características y demás información en el capítulo correspondiente.

Para la modelación, en primer lugar, se confeccionó el MDE, el mapa de uso de suelo y tipo de suelo de toda la cuenca. El MDE fue realizado con la ayuda de mediciones realizadas por el Municipio de Guarapuava con las cuales se confeccionaron curvas de nivel y luego el correspondiente MDE. Se utilizaron estas mediciones ya que tenían una mejor densidad de medición dentro de la zona urbana, por lo que se consideró que el MDE resultado será de mejor calidad que el posible obtener de modelos como ASTER, SRTM, etc. El mapa de uso de suelo fue obtenido del trabajo realizado por [Gomes \(2014\)](#), quien clasifica el uso del suelo en vegetación arbórea/arbustiva, vegetación rastrera/cultivo, suelo expuesto/desnudo, áreas húmedas y áreas construidas. El mapa de tipo de suelo muestra que en la cuenca del Río Cascavel existen tres tipos según la clasificación de EMBRAPA: *Neossolos*, *Latosolos Brunos* y *Organossolos* siendo la mayor parte de la cuenca cubierta por los *Latosolos* ([Bhering et al., 2008](#) citado por [Gomes, 2014](#)) (Figura 4-14).

MODELACIÓN HIDROLÓGICA-HIDRÁULICA TOTALMENTE DISTRIBUIDA DE UNA CUENCA FUERTEMENTE ANTROPIZADA – CASO DEL RÍO CASCAVEL (GUARAPUAVA/PR, BRASIL)

El modelo digital de elevación fue modificado teniendo en cuenta las pruebas realizadas anteriormente con TREX en la cuenca urbana teórica (Sección 4.1); con la ayuda de la clasificación de las imágenes satelitales se establecieron los sectores construidos, en estos sectores el MDE se elevó 2 m. para simular el efecto de los techos. Luego con ayuda del mapa proveniente de Catastro se bajó el sector de calles (calzada y veredas) 0,15 m. para simular el hecho de que la calle se encuentra en una cota inferior que las manzanas.

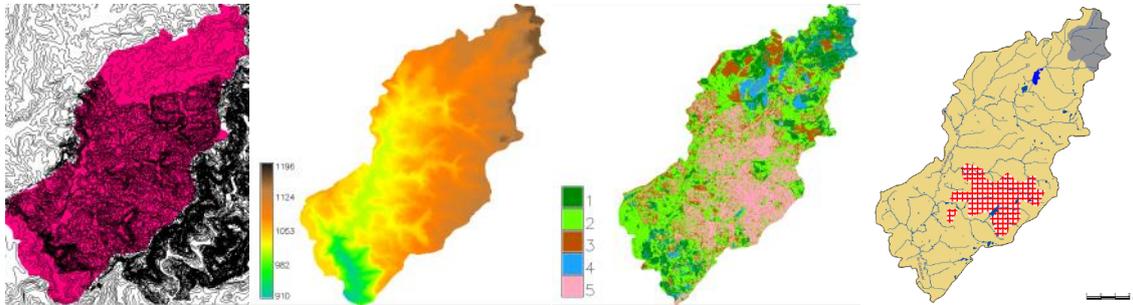


Figura 4-14 - Mapas de ingreso para la modelación de la cuenca de Cascavel en TREX. De izquierda a derecha: curvas de nivel de la cuenca utilizadas para producir MDE, MDE, mapa de uso de suelo y mapa de tipo de suelo.

Luego, se focalizó en la modelación de un sector de la cuenca. Para ello se delimitó una subcuenca dentro de la cuenca de Cascavel con la ayuda de GRASS GIS. Con ayuda de GRASS también se localizaron las bocas de tormenta en este sector y la elevación de las mismas.

Una vez realizado lo anterior, se realizó la modelación hidrológica en TREX del sector de la cuenca con una lluvia teórica de 50 mm/h por 2 horas, con el objetivo de probar y mejorar el procedimiento fijado. La cuenca modelada tiene un área de 0,312 km², compuesta de 12.476 celdas activas de 5 m x 5 m. Dentro de dicha cuenca existen 77 bocas de tormenta que incluyen los distintos tipos de bocas mencionadas anteriormente (vertical, horizontal y combinadas). Se realizó también una modelación de dicha cuenca, sin tener en cuenta las bocas de tormenta existentes en la misma, para de esta forma, comparar el efecto que éstas tienen en la respuesta hidrológica de la cuenca.

Luego, se procedió a realizar el modelo en SWMM colocando las 77 bocas de tormenta con sus respectivos caudales (Figura 4-15). Las conducciones se tomaron de 0,8 m de diámetro, circulares. La dirección de las conducciones se estableció semi-automáticamente con ayuda del mapa de amanzanamiento y el modelo digital de elevación.

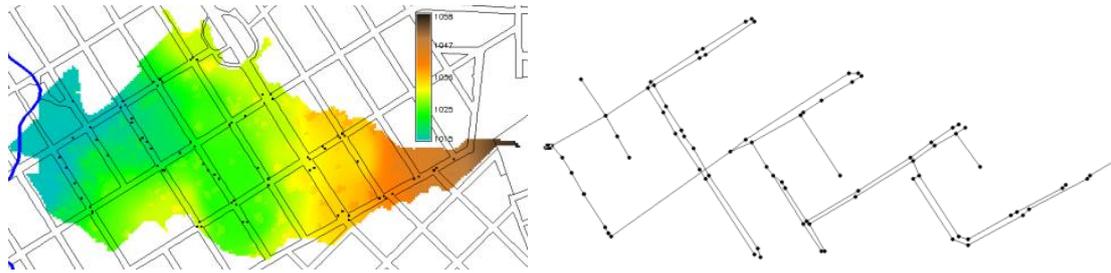


Figura 4-15 - Izquierda: visualización del MDE del sector a modelar. Las celdas negras corresponden a las bocas de tormenta. Derecha: modelo utilizado en SWMM.

La aplicación del modelo de prueba en TRES y SWMM no ha tenido mayores dificultades. No se realizó una calibración ni validación del mismo en este proceso ya que el objetivo de esta pequeña modelación fue la de prueba del modelo para observar los distintos errores que se podían generar en la corrida (en el código fuente), si esta era abortada por algún inconveniente y las posibles mejoras en el código fuente y en el procesamiento de los datos para una mejor implementación. Se observa como al incluir las bocas de tormenta el caudal pico de crecida del hidrograma se anticipa con respecto a la cuenca sin desagüe pluvial (Figura 4-16). También gracias al modelo espacialmente distribuido TRES se puede visualizar y analizar los resultados en la extensión de la cuenca.

Figura 4-16 - Hidrogramas obtenidos al aplicar TRES en una cuenca urbana sin tener en cuenta bocas de tormenta y conductos en comparación con la utilización de TRES en conjunto con SWMM.

Capítulo 5: Información de base

5.1. Datos disponibles

Se utilizaron diversas fuentes de datos para la confección de los modelos de cuenca en TREN y SWMM. Para confeccionar el modelo en TREN es necesario la obtención de mapas del modelo digital de elevación, tipo de suelo y uso de suelo, como así también las características de los anteriores (parámetros de infiltración, rugosidad e intercepción vegetal). Sumado a lo anterior, según el procedimiento propuesto para modelar el sector urbanizado dentro de la cuenca del Rio Cascavel es necesario conocer la ubicación y las características de las bocas de tormenta, conductos y canales. Las bocas de tormenta, deben ser ingresadas en TREN como celdas especiales en el mapa de tipo de suelo, como así también los canales abiertos y lagunas.

En SWMM se utilizan, para confeccionar el modelo, la ubicación y cota de cada boca de tormenta y nodos de conductos (abiertos y cerrados) como así también características de estos conductos: rugosidad y sección.

5.1.1. Modelo digital de elevaciones

El modelo digital de elevación (MDE) fue elaborado a través de la interpolación lineal de datos relevados por distintas campañas efectuadas por la Municipalidad de Guarapuava, provistas por la Universidad Estatal de Centro Oeste (UNICENTRO) de Brasil y por la red de curvas de nivel existentes en la zona cada 20 m editadas por la Dirección del Servicio Geográfico del Ejército Brasileiro (Figura 5-1).

Se utilizó estos datos para realizar el MDE ya que el relevamiento realizado principalmente por UNICENTRO se concentraba en el sector urbano de Guarapuava, por lo que se consideró que se iba a obtener mucha mayor precisión en este sensible sector que con otras fuentes de datos como SRTM, ASTER, etc., que generalmente en estos sectores se generan errores.

En la izquierda de la Figura 5-1 se puede observar la densidad de puntos medidos en coincidencia con el sector urbano de la localidad de Guarapuava.

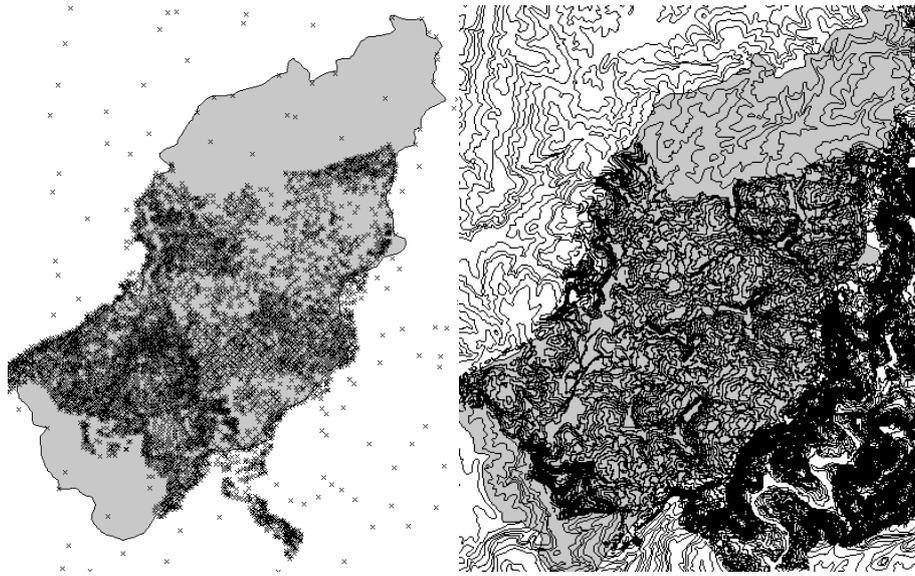


Figura 5-1 - Vista de los puntos medidos en la cuenca del Rio Cascavel y curvas de nivel utilizadas para la confección del MDE.

La interpolación fue realizada con el sistema de información geográfica GRASS GIS (Figura 5-2) utilizando para ello una resolución de malla de 5 m (más adelante se explicará la diferenciación de resolución que se realizó en los sectores rurales de la Cuenca del Rio Cascavel).

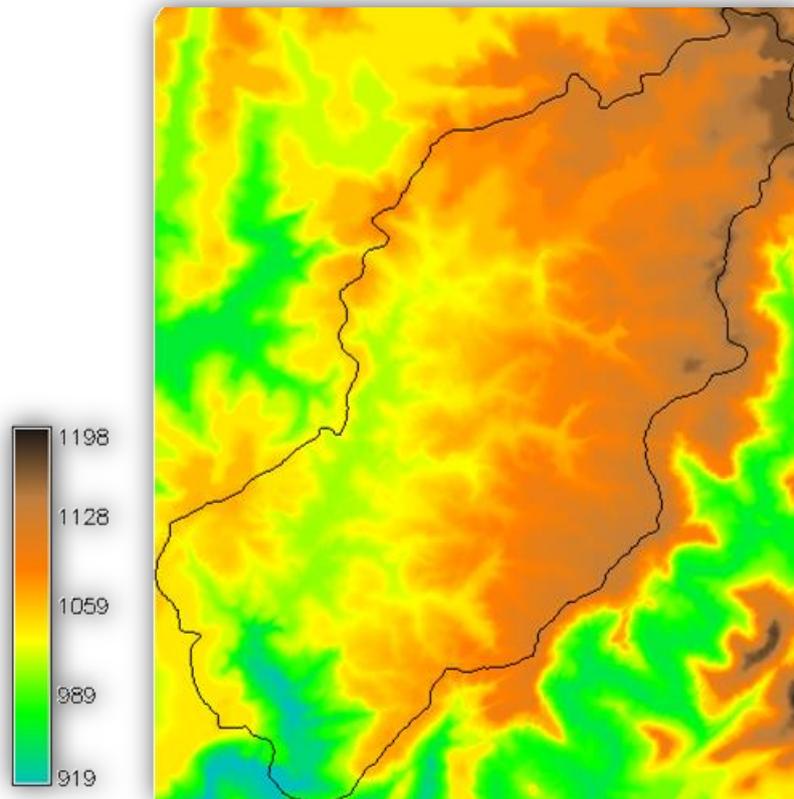


Figura 5-2 - MDE de la cuenca del Río Cascavel - Resolución 5 m x 5 m.

A este modelo digital de elevación, se lo procesó para poder representar correctamente los siguientes elementos que influyen en la modelación de las cuencas en general y en las cuencas urbanas en particular, como ser: los cauces y arroyos abiertos, las zonas de calles y las interferencias o barreras que forman las construcciones.

En primer lugar, se realizó el procesamiento del modelo digital de elevaciones para captar adecuadamente las depresiones existentes en los cauces ya que con la interpolación lineal de los puntos medidos y curvas de nivel no es posible captar estos elementos. Por tal motivo, si no se corrige se producen diversos errores en la modelación de la dirección del escurrimiento superficial en TREX.

Para ello, se produjo el “hundimiento” de las celdas correspondientes a los cauces, para ello, se utilizaron los mapas de red de drenaje existentes en las cartas topográficas y se descendió 1 m. las celdas correspondientes a los cauces. Posteriormente, se extrajeron estos puntos para incorporarlo al mapa original de puntos y curvas de elevación para una nueva interpolación lineal.

En segundo lugar, se realizó el descenso en 15 cm de las celdas correspondientes a las calles de la ciudad, para ello, se utilizaron los mapas de amanzanamiento de la ciudad (Figura 5-3).

Por último, se sobreelevaron 2 m las celdas correspondientes a las construcciones, para ello se utilizaron mapas base de catastro del Municipio de Guarapuava e imágenes satelitales (Figura 5-4 y Figura 5-5).

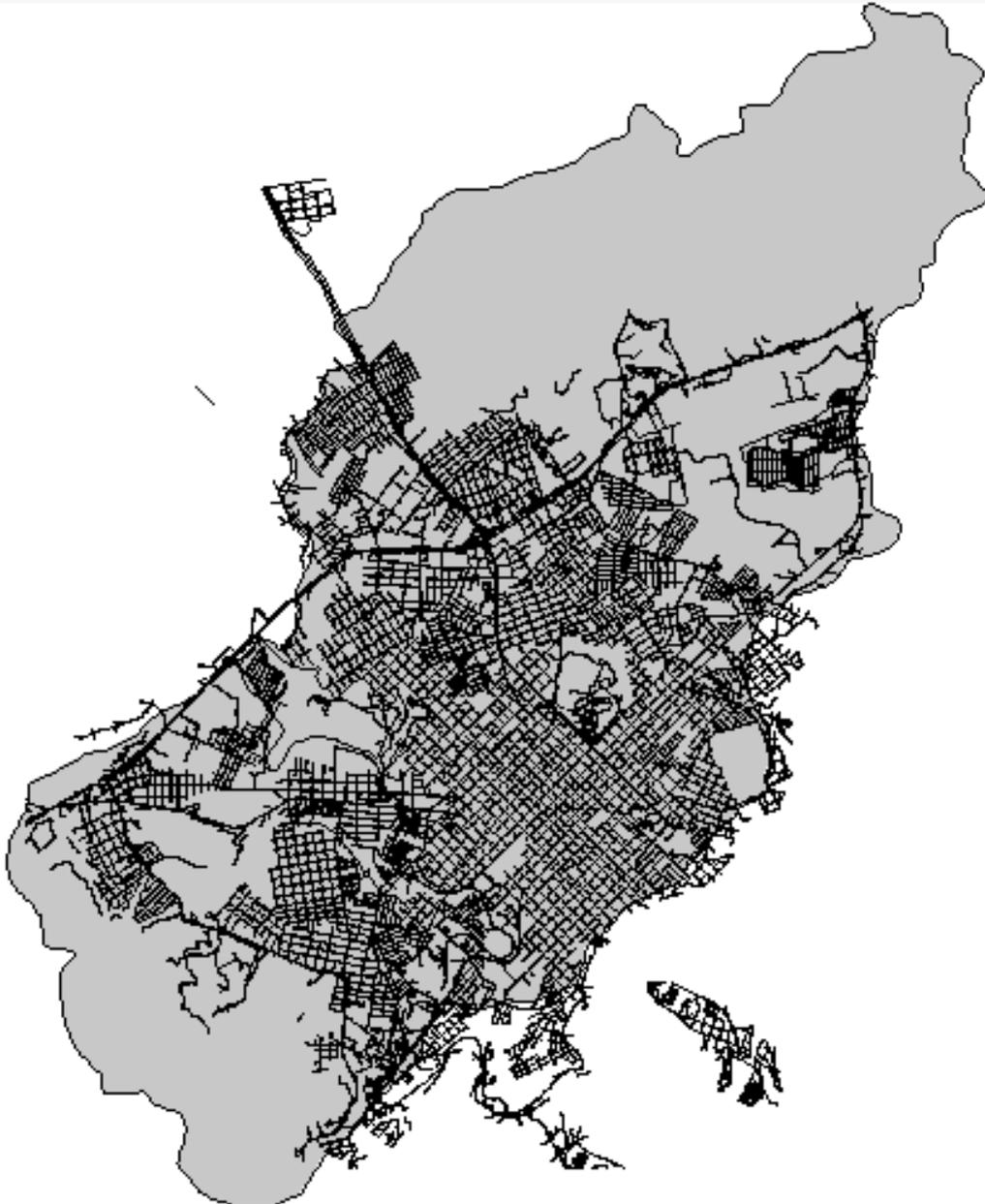


Figura 5-3 - Mapa de calles utilizado para modificar el MDE.



Figura 5-4 - Mapa auxiliar para modificar el MDE.

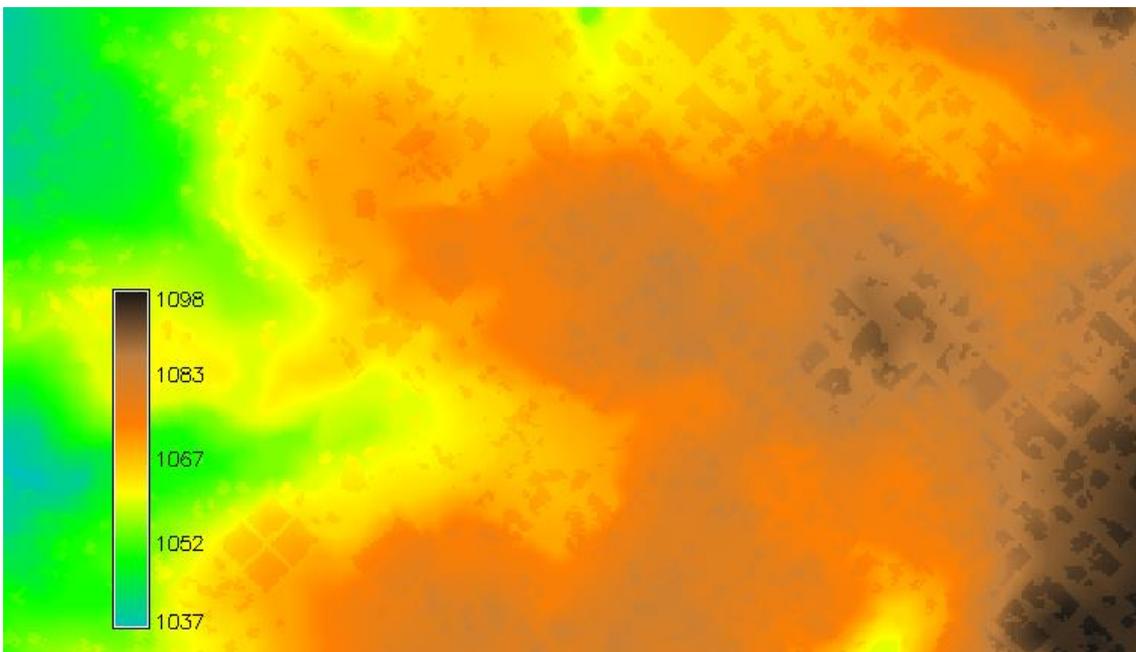


Figura 5-5 - Porción del MDE de la cuenca del Río Cascavel modificado

5.1.2. Datos pluviométricos y fluviométricos

En el presente estudio se utilizan datos monitoreados automáticamente de precipitaciones y de caudales.

Los datos de precipitaciones, fueron seleccionados de distintas estaciones pluviométricas y pluviográficas dentro y cercanas a la Cuenca del Río Cascavel, quedando seleccionadas las siguientes estaciones (Tabla 5-1):

Tabla 5-1 - Datos de precipitaciones utilizados en el trabajo.

Código	Tipo	Nombre	Latitud	Longitud
65810700	Pluviográfica- Fluviográfica	FOZ DO RIO CASCAVEL	-25,4161	-51,508
02551010	Pluviométrica	COLÉGIO AGRICOLA	-25,364	-51,496
02551034	Pluviométrica	INVERNADINHA	-25,300	-51,430

Las estaciones anteriores se encuentran en la base de datos de la Agencia Nacional del Agua de Brasil (ANA) y son operadas por distintos organismos, como ser: el instituto del Agua de Paraná (AGUASPARANA) que opera la estación Invernadinha y Foz do Rio Cascavel y el Instituto Agronómico de Paraná (IAPAR) que opera la estación del Colegio Agrícola Guarapuava.

De la estación pluviográfica de Cascavel, se obtuvieron datos de precipitación con intervalo temporal de 15 minutos. De las estaciones pluviométricas se obtuvieron datos diarios de precipitación.

Para distribuir temporalmente las precipitaciones de las estaciones pluviométricas se relacionaron las precipitaciones diarias de cada estación pluviométrica con la estación pluviográfica, y luego según la lámina caída en cada intervalo de tiempo en la estación pluviográfica se obtuvo la proporción de esta lámina con respecto a la lámina diaria de la misma estación. Por último para cada estación pluviométrica se distribuyó temporalmente la precipitación diaria según las proporciones obtenidas anteriormente para cada intervalo del día.

Para los datos de caudales, se utilizaron los datos provenientes de la estación fluviométrica Cascavel, que también brinda datos de caudales cada 15 minutos.

En la estación fluviométrica Cascavel, existe un puesto fijo donde mide el nivel del río cada 15 minutos, y luego a través de la curva H-Q determinada para dicho río se transforma a caudal.

La curva H-Q fue determinada mediante 26 aforos que se presentan a continuación en conjunto con la curva que fue ajustada para dichos aforos. Luego en las figuras se presentan fotografías de la estación fluviométrica y del momento en que se realizaron los aforos en la misma.

Se observa así la poca cantidad de aforos existente y en el rango de tirantes que fueron realizados, lo que puede sumar entonces a incertidumbre a los datos de caudales medidos.

MODELACIÓN HIDROLÓGICA-HIDRÁULICA TOTALMENTE DISTRIBUIDA DE UNA CUENCA FUERTEMENTE ANTROPIZADA – CASO DEL RÍO CASCAVEL (GUARAPUAVA/PR, BRASIL)

Tabla 5-2 – Aforos realizados en estación fluviométrica Foz do Rio Cascavel.

Cota [m]	Caudal Total [m ³ /s]
0.25	0.65
0.25	0.71
0.25	0.72
0.25	0.7
0.35	1
0.35	0.93
0.35	1.07
0.35	1.17
0.35	1.1
0.35	1.16
0.35	0.94
0.35	1.07
0.69	6.16
0.69	6.76
0.69	6.38
0.69	5.21
0.69	6.59
0.69	5.94
0.69	6.54
0.69	6.47
2.1	47.58
2.1	46.32
2.1	48.14
2.1	41.34
2.2	53.26
2.2	58.82

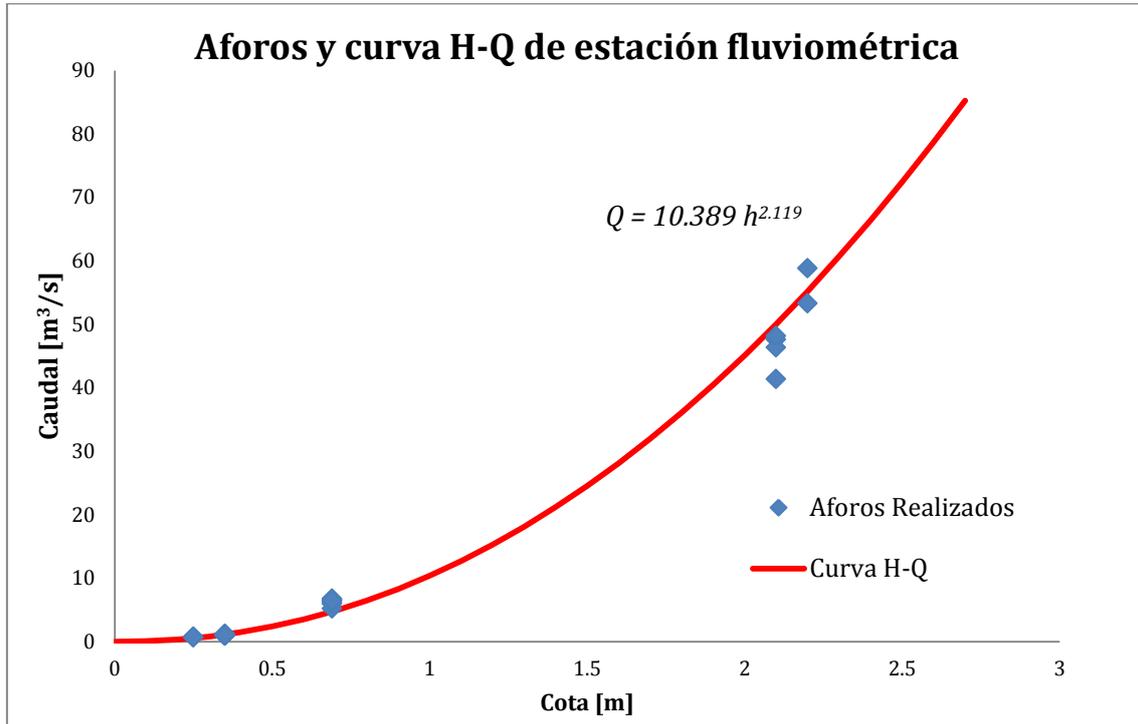


Figura 5-6 - Curva H-Q de la estación fluviométrica Foz do Rio Cascavel.



Figura 5-7 - Vista de la estación fluviométrica en una crecida.



Figura 5-8 - Realización de aforo en sector de la estación fluviométrica.



Figura 5-9 - Vista en detalle de la estación fluviométrica.



Figura 5-10 - Vista desde aguas abajo hacia aguas arriba de estación fluviométrica.

Cabe aclarar, que en la base de datos del ANA se encuentran un total de ocho estaciones pluviométricas en la zona de la Cuenca del Rio Cascavel, sin embargo no existía coincidencia temporal con los datos disponibles de la estación pluviográfica-fluviográfica de Cascavel (Tabla 5-3).

En cuanto a los caudales líquidos, si bien en el trabajo de [Gomes \(2014\)](#), se presentan las mediciones de caudales en distintas subcuencas del Rio Cascavel, esa información finalmente no estuvo disponible.

Los eventos seleccionados entonces se encuentran entre las fechas de datos disponibles que van desde Junio de 2011 a Diciembre de 2013 donde se tienen datos de medición de caudales líquidos.

**MODELACIÓN HIDROLÓGICA-HIDRÁULICA TOTALMENTE DISTRIBUIDA DE UNA CUENCA FUERTEMENTE ANTROPIZADA – CASO DEL RÍO CASCAVEL
(GUARAPUAVA/PR, BRASIL)**

Tabla 5-3 - Estaciones pluviográficas, pluviométricas y fluviográficas de la zona de Estudio.

Fechas		Precipitaciones							
Año	Meses	Est. Cascavel (65810700)	Est. Guarapuava (est 2551010)	Foz do Rio Bananas (65808500)	Fundao Guarapuava (2551070)	Salto Santiago Guarapuava (2551050)	Est. Guarapuava (est 2551000)	Guarapuava (est 02551006)	Invernadinha (est 02551034)
2011	Enero		Diario	A partir de 2014	A partir de 2016 c/ 15 min	A partir de 2016 c/ 15 min	Diario	Hasta 1980	Diario
	Febrero		Diario				Diario		Diario
	Marzo		Diario				Diario		Diario
	Abril		Diario				Diario		Diario
	Mayo		Diario				Diario		Diario
	Junio	c / 15 min	Diario				Diario		Diario
	Julio	c / 15 min	Diario				Diario		Diario
	Agosto	c / 15 min	Diario				Diario		Diario
	Septiembre	c / 15 min	Diario				Diario		Diario
	Octubre	c / 15 min	Diario				Diario		Diario
	Noviembre	c / 15 min	Diario				Diario		Diario
	Diciembre	c / 15 min	Diario				Diario		Diario
2012	Enero	c / 15 min	Diario				Diario		Diario
	Febrero	c / 15 min	Diario				Diario		Diario
	Marzo	c / 15 min	Diario				Diario		Diario
	Abril	c / 15 min	Diario				Diario		Diario



MODELACIÓN MATEMÁTICA DISTRIBUIDA DEL IMPACTO
HIDROLÓGICO-AMBIENTAL DE LOS INCENDIOS EN LA ZONA
SERRANA DE LA PROVINCIA DE CÓRDOBA

	Mayo	S/Datos	Diario				Diario		Diario
	Junio	S/Datos	Diario				Diario		Diario
	Julio	S/Datos	Diario				Diario		Diario
	Agosto	S/Datos	Diario				Diario		Diario
	Septiembre	S/Datos	Diario				Diario		Diario
	Octubre	c / 15 min	Diario				Diario		Diario
	Noviembre	c / 15 min	Diario				Diario		Diario
	Diciembre	c / 15 min	Diario				Diario		Diario
2013	Enero	c / 15 min	Diario				Diario		Diario
	Febrero	S/Datos	Diario				Diario		Diario
	Marzo	S/Datos	Diario				Diario		Diario
	Abril	S/Datos	Diario				Diario		Diario
	Mayo	S/Datos	Diario				Diario		Diario
	Junio	S/Datos	Diario				Diario		Diario
	Julio	S/Datos	Diario				Diario		Diario
	Agosto	S/Datos	Diario				Diario		Diario
	Septiembre	c / 15 min	Diario				Diario		Diario
	Octubre	c / 15 min	Diario				Diario		Diario
	Noviembre	c / 15 min	Diario				Diario		Diario
	Diciembre	c / 15 min	Diario				Diario		Diario

La ubicación de las distintas estaciones con relación a la cuenca se puede apreciar en la siguiente imagen:

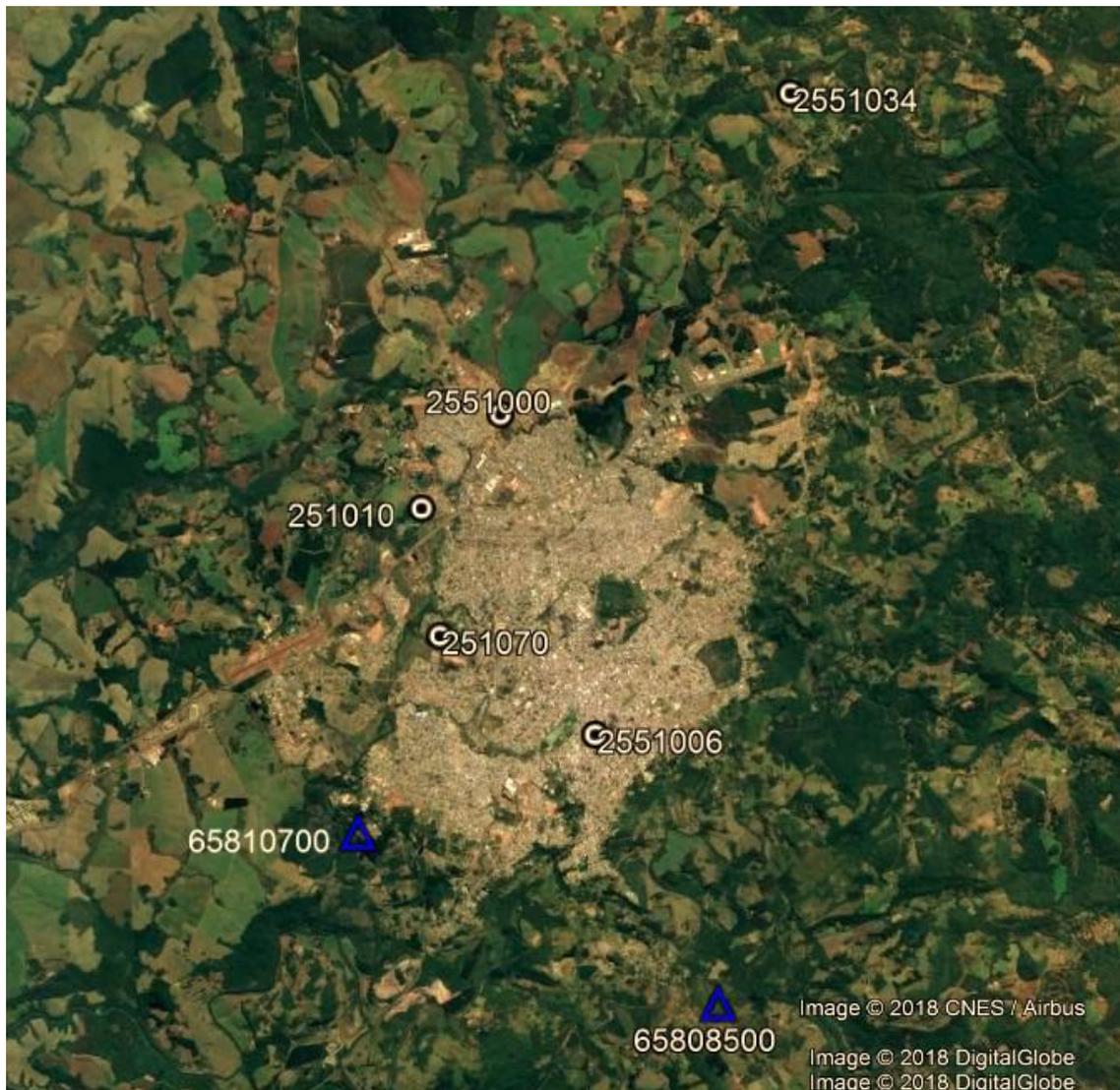


Figura 5-11 - Ubicación de estaciones de precipitaciones en la zona de la Cuenca del Río Cascavel.

5.1.2.1. Otros datos analizados para su aplicación

Se analizó la utilización de otros tipos de fuente de datos de precipitación para la aplicación en el modelo hidrológico:

a- Datos provenientes de radares meteorológicos:

En la zona de la cuenca de estudio, el Sistema Meteorológico de Paraná (Simepar) cuenta con tres radares meteorológicos, localizado estratégicamente en Teixeira Soares, Cascavel y Curitiba (Figura 5-12).

El Simepar presenta la imagen del mosaico de radares, es decir, una composición de estos radares meteorológicos, abarcando todo Estado de Paraná y áreas vecinas. A través de la visualización de la secuencia de imágenes compuestas por este mosaico es posible acompañar, con calidad y en tiempo real, las informaciones del posicionamiento,

desplazamiento e intensidad de las áreas de lluvia, así como realizar previsiones de corto plazo en el área de alcance del radar.

En referencia a la escala de color de estas imágenes, los tonos en rojo y rosa están asociados a lluvias más intensas, e incluso tempestades, mientras que los colores con tonalidades de amarillo y verde representan lluvias de menor intensidad.

Sin embargo, no fue posible conseguir información histórica de esta fuente de datos.

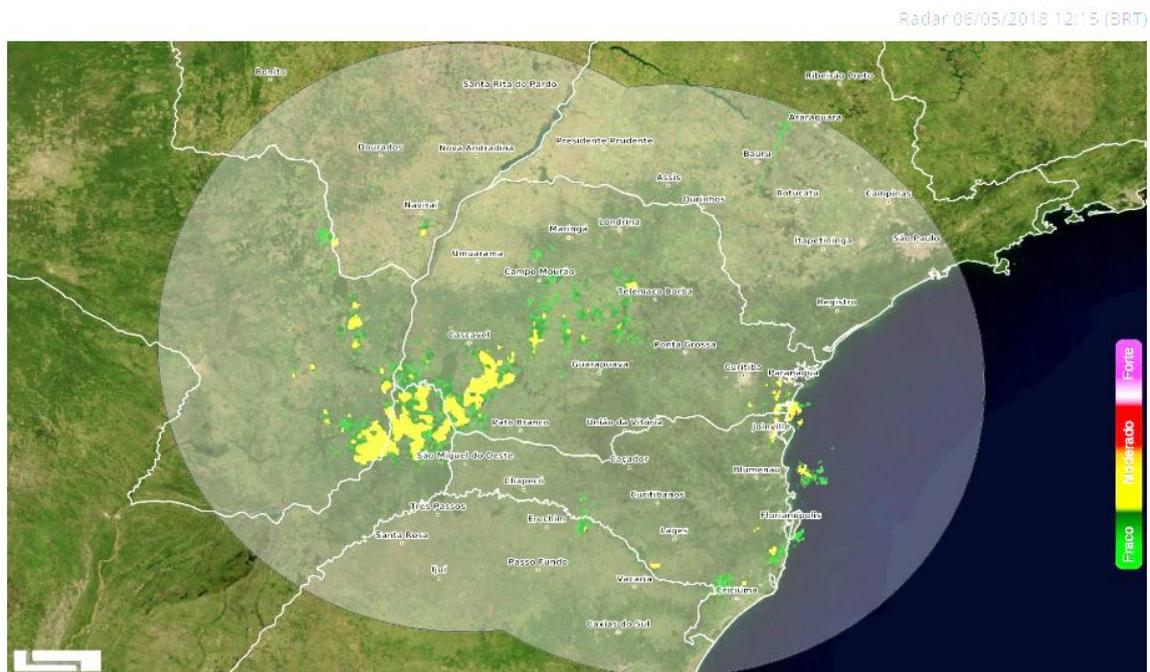


Figura 5-12 - Imagen de datos de radar disponible en zona de estudio.

b- Datos provenientes de información satelital.

El satélite meteorológico es un equipo que realiza el monitoreo del tiempo y del clima de la Tierra desde el espacio, permitiendo la identificación de los sistemas atmosféricos y el posicionamiento de las nubes tanto por la noche y el día. Además, estos equipos se utilizan para el monitoreo de quemas, niveles de contaminación, deforestación, corrientes marítimas y actividad de volcanes.

El Sistema Meteorológico do Paraná (Simepar) recibe estas imágenes del satélite meteorológico GOES13, con actualización cada 15 minutos, ayudando a la vigilancia meteorológica del Paraná y áreas vecinas.

En estas imágenes, la información presentada se refiere a la temperatura en la cima de las nubes, mientras que las temperaturas más bajas (muy frías) representan nubes más desarrolladas verticalmente, que están directamente asociadas con potencial riesgo de temporales. Estas nubes son identificadas por los colores rosa, blanco, negro y rojo en la imagen (Figura 5-13).

MODELACIÓN HIDROLÓGICA-HIDRÁULICA TOTALMENTE DISTRIBUIDA DE UNA CUENCA FUERTEMENTE ANTROPIZADA – CASO DEL RÍO CASCAVEL (GUARAPUAVA/PR, BRASIL)

Las nubes más bajas, como las de niebla, son presentadas por tonos de azul y gris, destacada por la palabra "Frío" en la escala de la imagen (Figura 5-13).

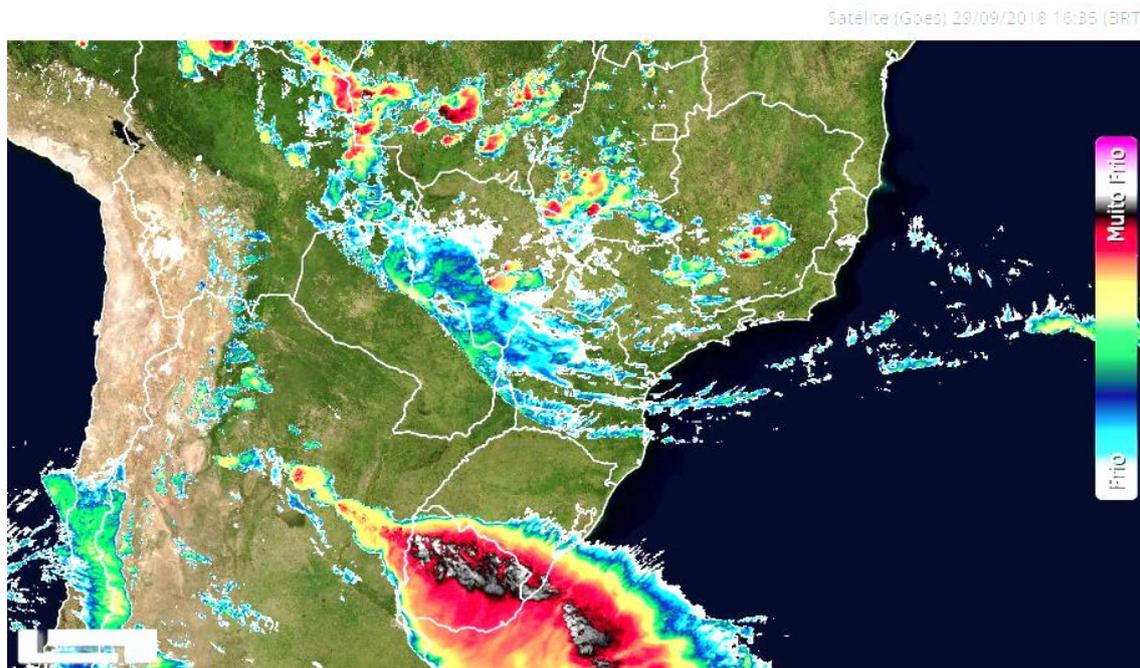
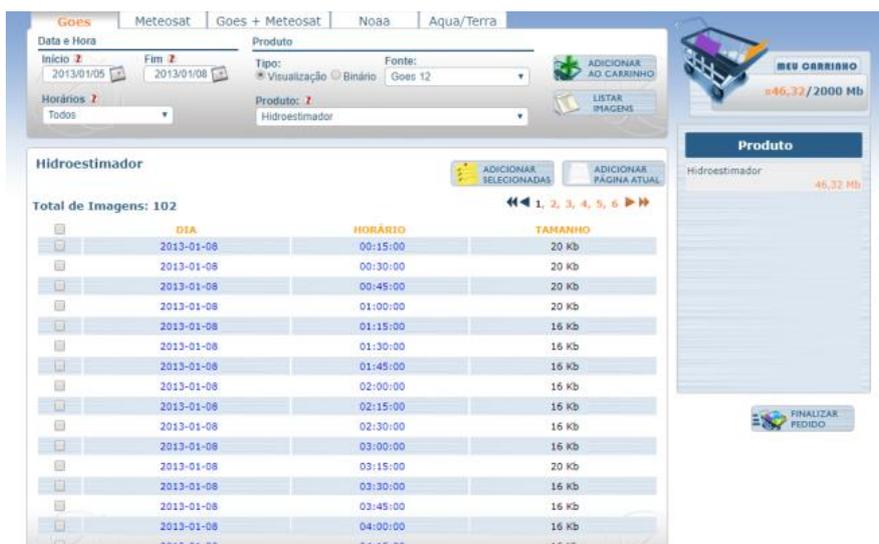


Figura 5-13 - Ejemplo de imagen del satélite GOES 13.

Se encuentran imágenes procesadas, que estiman las precipitaciones caídas en el sector que abarcan dichas imágenes.

Sin embargo, estas imágenes no fueron utilizadas ya que no coincidía el inicio de los datos disponibles de imágenes con los datos de medición de caudal. En el momento de realizar el trabajo, si existían datos coincidentes con la fecha de medición de caudal (GOES 12) pero eran datos diarios. Actualmente, se encuentran cada 15 minutos (GOES 13) (Figura 5-14 y Figura 5-15).



DATA	HORARIO	TAMANHO
2013-01-08	00:15:00	20 Kb
2013-01-08	00:30:00	20 Kb
2013-01-08	00:45:00	20 Kb
2013-01-08	01:00:00	20 Kb
2013-01-08	01:15:00	16 Kb
2013-01-08	01:30:00	16 Kb
2013-01-08	01:45:00	16 Kb
2013-01-08	02:00:00	16 Kb
2013-01-08	02:15:00	16 Kb
2013-01-08	02:30:00	16 Kb
2013-01-08	03:00:00	16 Kb
2013-01-08	03:15:00	20 Kb
2013-01-08	03:30:00	16 Kb
2013-01-08	03:45:00	16 Kb
2013-01-08	04:00:00	16 Kb
2013-01-08	04:15:00	16 Kb

Figura 5-14 - Visualización de la página web disponible para la descarga de datos del Hidroestimador.



Figura 5-15 - Base de datos de imágenes espaciales procesadas.

Por lo anterior, se decidió la utilización de las estaciones pluviométricas y pluviográficas existentes en la cuenca.

5.1.3. Tipo de suelo

Para determinar el tipo de suelo para la creación del modelo en TREX se utilizó el mapa desarrollado por [Gomes \(2014\)](#). Este mapa fue presentado anteriormente.

Al mapa de tipo de suelo, el cual identificaba tres tipos, se le agregaron elementos para completar el modelo en TREX, estos elementos son:

- Sectores con suelo impermeabilizado.
- Bocas de tormenta: ubicación y tipo de boca de tormenta.
- Celdas donde existen cauces y lagos o lagunas.

5.1.3.1. Sectores con suelo impermeabilizado

Para determinar los sectores con suelo impermeabilizado, como ser calles asfaltadas o construcciones, se utilizaron, al igual que con el mapa de elevaciones, los datos catastrales, imágenes satelitales y los planos de parcelario urbano.

De esta forma, se agregó al mapa original de tipo de suelos, aquellos sectores donde existe un suelo con características impermeables (Figura 5-16).

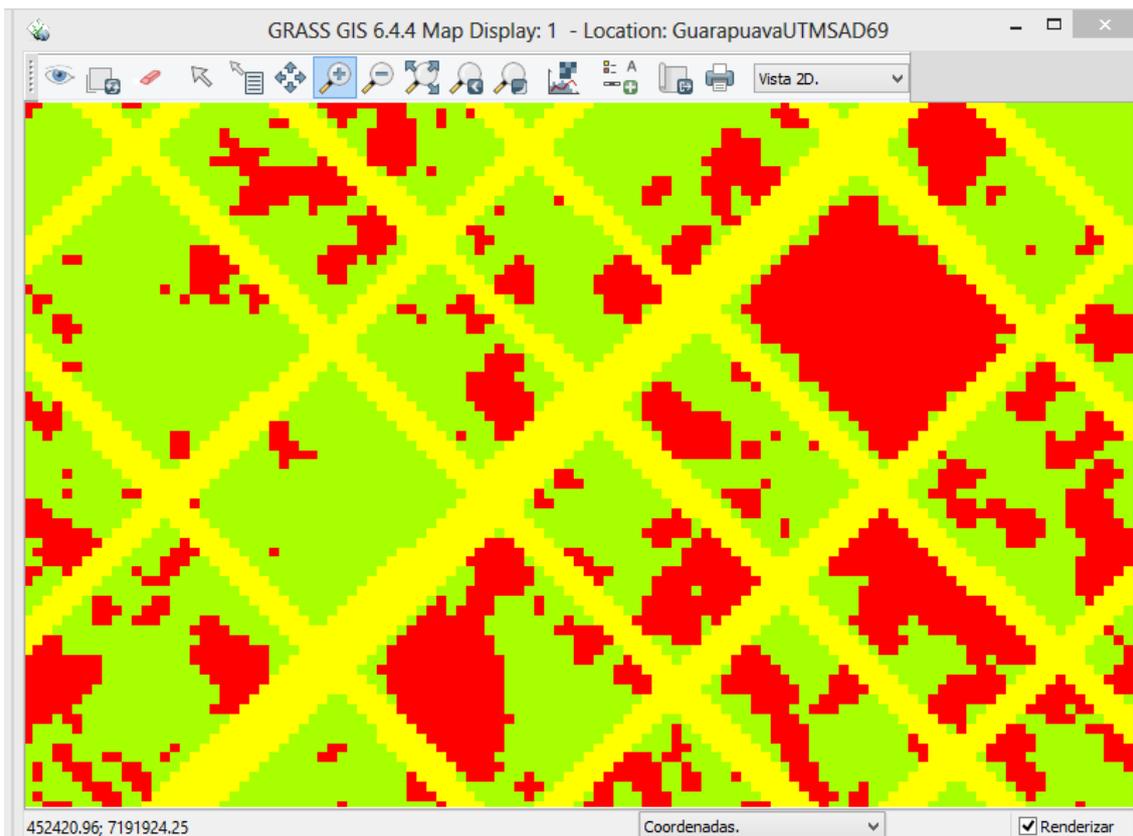


Figura 5-16 - Modificación del mapa de tipo de suelo inicial con el agregado de áreas impermeables.

5.1.3.2. Sectores de cauces de ríos naturales y lagos o lagunas

En este caso, se utilizaron los mismos mapas vectoriales que al desarrollar el mapa digital de elevaciones para generar celdas con un tipo de suelo especial en los sectores de los cauces y lagos o lagunas (Figura 5-17).

Este tipo de suelo tendrá propiedades tales que se infiltre todo el escurrimiento que llegue hasta estas celdas.

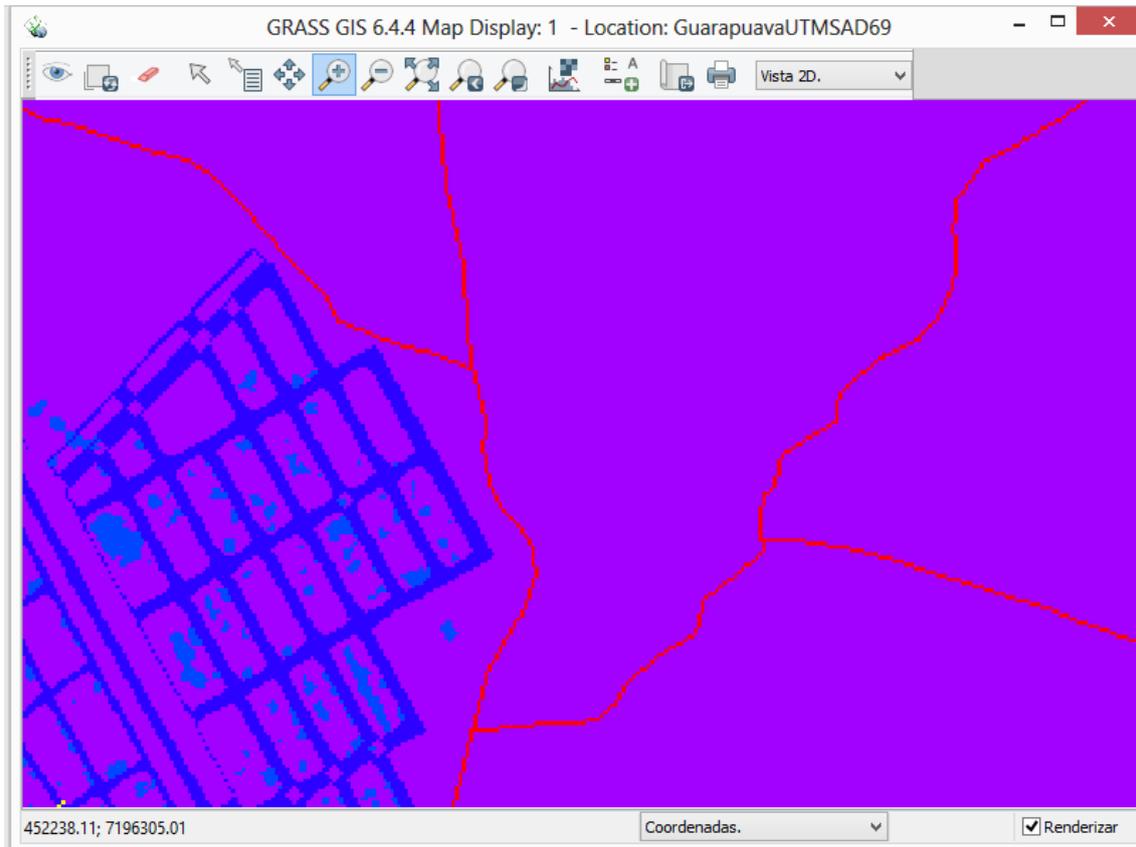


Figura 5-17 - Modificación del mapa de tipo de suelo inicial con el agregado de tipo de suelo correspondiente a cauces.

Las lagunas, fueron relevadas in situ y con información de imágenes satelitales, agregando el tipo de suelo especial para las mismas, y luego se analizó si éstas están conectadas o no al sistema de drenaje fluvial de la ciudad (Figura 5-18).



Figura 5-18 - Modificación del mapa de tipo de suelo inicial con el agregado de tipo de suelo correspondientes a embalses.

5.1.3.3. Determinación de ubicación y tipo de bocas de tormenta existentes en la Cuenca del Rio Cascavel

En la cuenca del Rio Cascavel, precisamente en la ciudad de Guarapuava existen numerosas bocas de tormenta, sin embargo, no se cuenta con datos de la ubicación y tipo de las mismas, es decir, no existen planos de la red de drenaje pluvial urbano.

Por tal motivo, se utilizó la estrategia de relevar las bocas de tormenta que existen en la ciudad de Guarapuava a través de la aplicación Street View de Google Earth existente en QGis (Figura 5-19).



Figura 5-19 - Visualización de bocas de tormenta de la localidad de Guarapuava en Street View.

De esta forma, se identificaron 4.339 bocas de tormentas en la ciudad de Guarapuava, cada una se clasificó según su tipo y longitud (Tabla 5-4 y Figura 5-20)

Tabla 5-4 - Cantidad y Tipo de Boca de Tormentas

Cantidad y tipo de bocas de tormenta			
Tipo	Código	Cantidad	Porcentaje
Vertical	1	2201	52%
Vertical Doble	2	52	1%
Horizontal	3	347	8%
Horizontal Doble	4	1	0%
Combinada Simple	5	1653	39%
Combinada Doble	6	85	2%
TOTAL		4.339	100 %

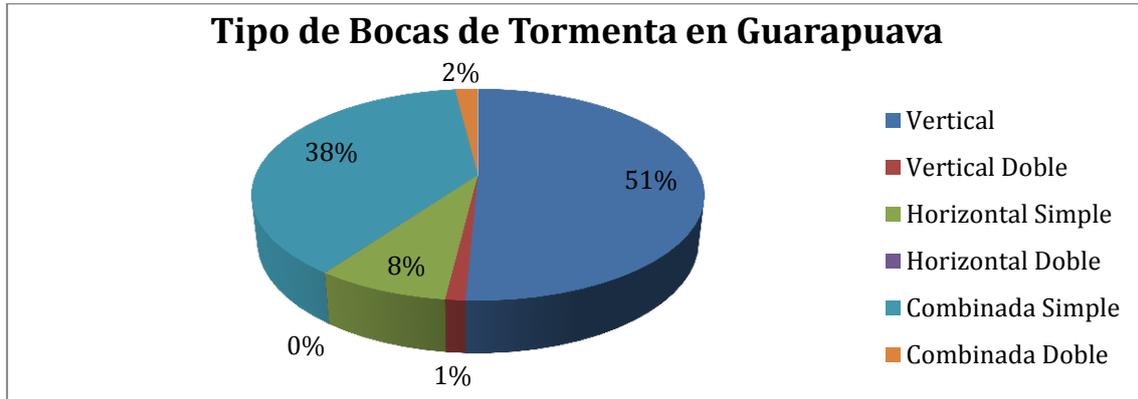


Figura 5-20 - Porcentaje de tipo de bocas de tormenta en la ciudad de Guarapuava.

Con el SIG QGIS de esta forma se creó un mapa vectorial con todas las bocas de tormenta y con las características de las mismas (Figura 5-21). Sumado a ello, se realizó el relevamiento de bocas de tormenta en sectores donde Street View no estaba disponible al momento del relevamiento (principios de 2016).

También se realizó una verificación de la ubicación de las bocas de tormenta realizadas con Street view al realizar un relevamiento in situ con GPS con precisión de 3 a 4 metros. Se observó una cierta correlación entre las bocas de tormenta identificadas con QGIS y las identificadas in situ. Sin embargo, en algunos sectores al comparar los dos relevamientos se observan diferencias, mayormente porque en el relevamiento (realizado por estudiantes de UNICENTRO) (Figura 5-22) no fueron vistas al momento de realizar el mismo (por taponamientos) o por el mismo error que genera realizar un relevamiento por GPS en una ciudad. Por ejemplo en la Figura 5-23 y Figura 5-24 se observa un detalle de las diferencias relevadas in situ y lo observado en Street view.

Se puede observar en las figuras mencionadas (Figura 5-22, Figura 5-23 y Figura 5-24) la gran cantidad de bocas de tormentas existentes en la localidad.

Por lo anterior, se revisaron las distintas diferencias y se decidió adoptar lo relevado por Street View ya que con esta herramienta se había realizado el relevamiento de toda la localidad.

Luego, se transformó este mapa para incluirlo (en formato raster) al mapa de tipo de suelo original de la cuenca.

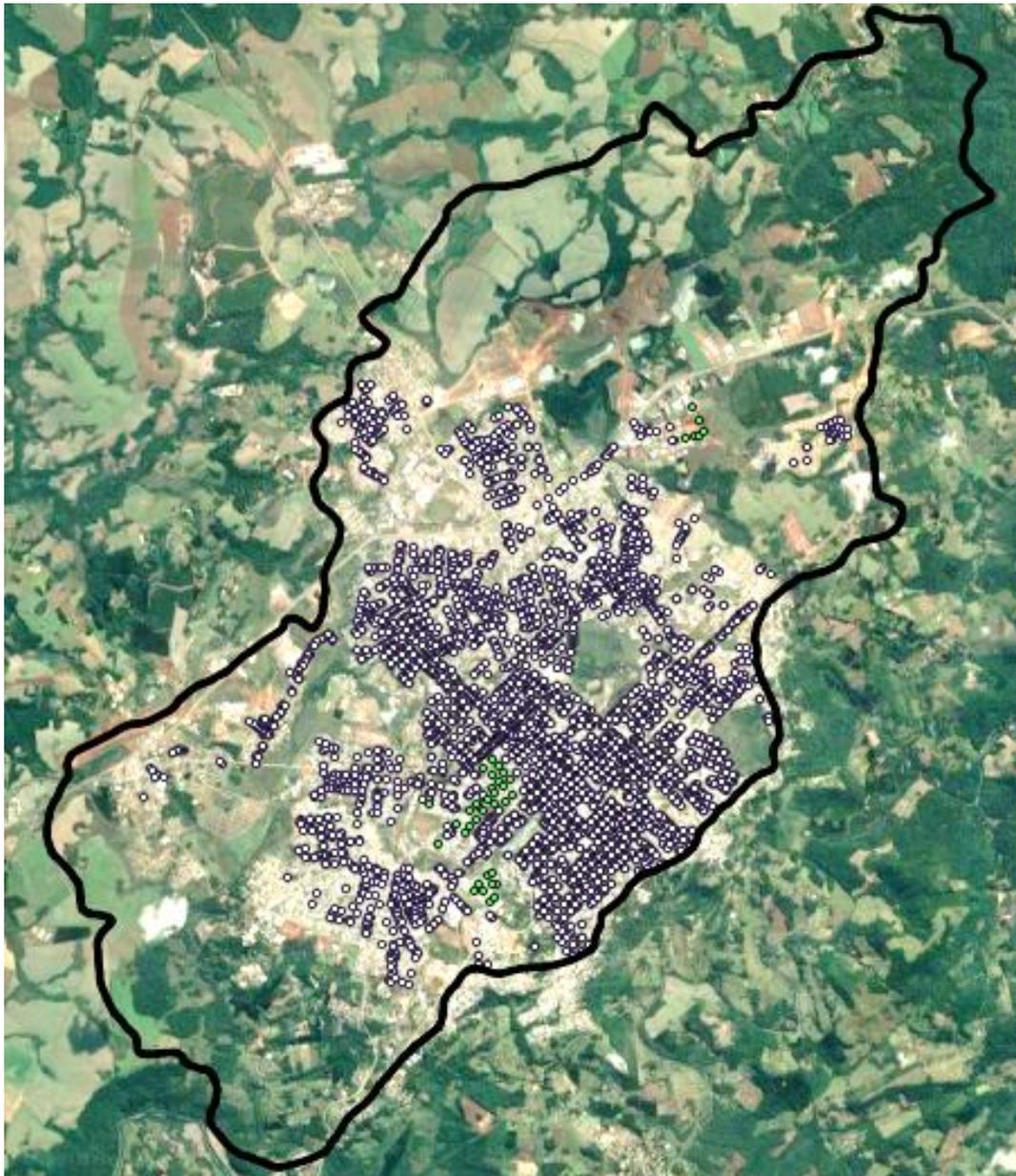


Figura 5-21 - Bocas de tormenta relevadas en la localidad de Guarapuava (puntos en color verde, representan bocas de tormenta identificadas *in situ*)

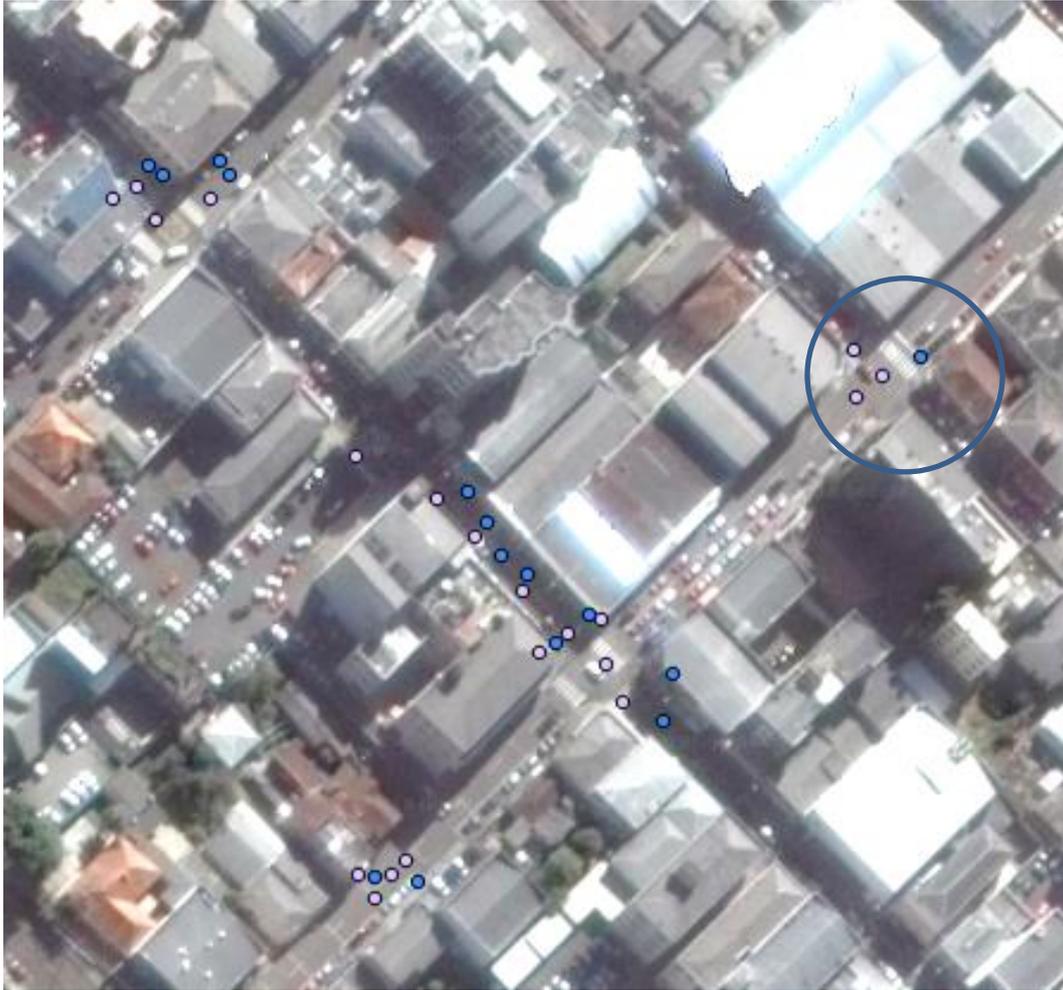


Figura 5-22 - Detalle de bocas de tormenta relevadas por Street View (lila) y verificadas in situ (azul).

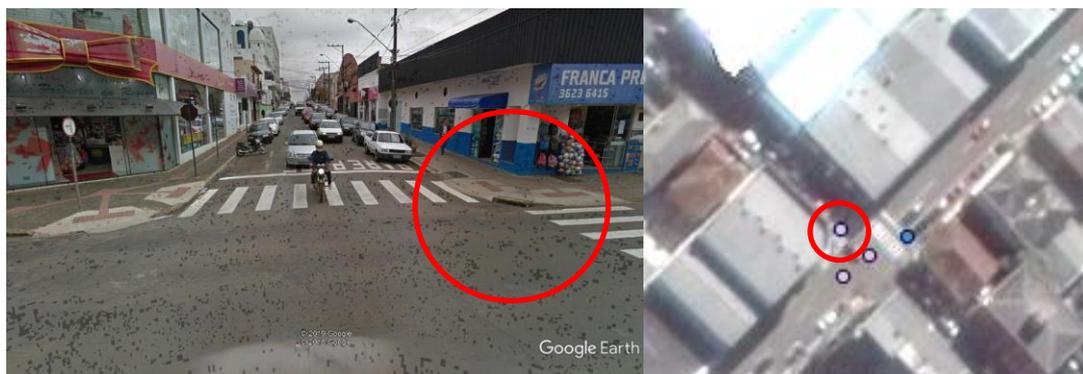


Figura 5-23 - Detalle de bocas de diferencias entre bocas tormenta relevadas por Street View y verificadas in situ. Verificación en Street View.

MODELACIÓN HIDROLÓGICA-HIDRÁULICA TOTALMENTE DISTRIBUIDA DE UNA CUENCA FUERTEMENTE ANTROPIZADA – CASO DEL RÍO CASCAVEL (GUARAPUAVA/PR, BRASIL)



Figura 5-24 - Detalle de bocas de diferencias entre bocas tormenta relevadas por Street View y verificadas in situ. Verificación en Street View.

Finalmente, se creó el mapa de tipo de suelo teniendo en cuenta los tipos reservados para las bocas de tormentas (del 1 al 6) según el cambio realizado convenientemente en el código fuente (Figura 5-25).

De esta forma, quedó formado el mapa raster del tipo de suelo a utilizar para la modelación (Figura 5-26) y en la Figura 5-27 se observa una gráfica de los porcentajes de tipo de suelo existente en la cuenca.

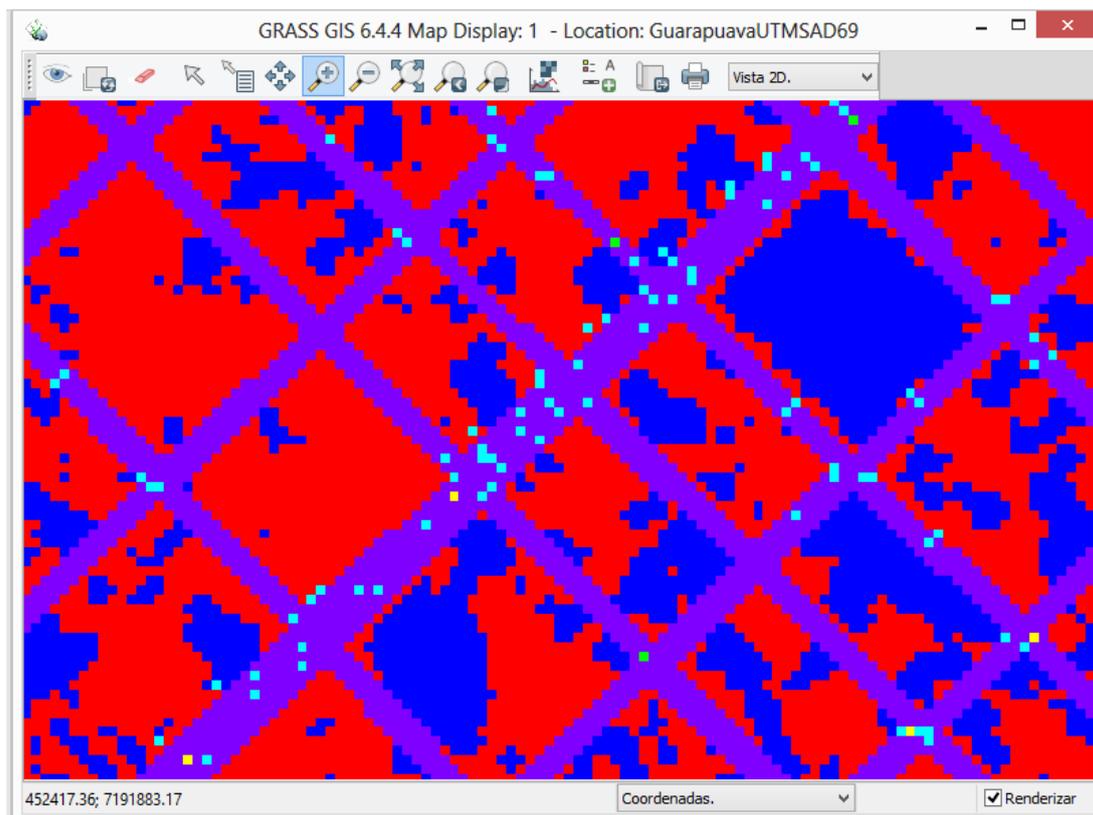


Figura 5-25 - Mapa de tipo de suelo con el agregado de las bocas de tormenta.

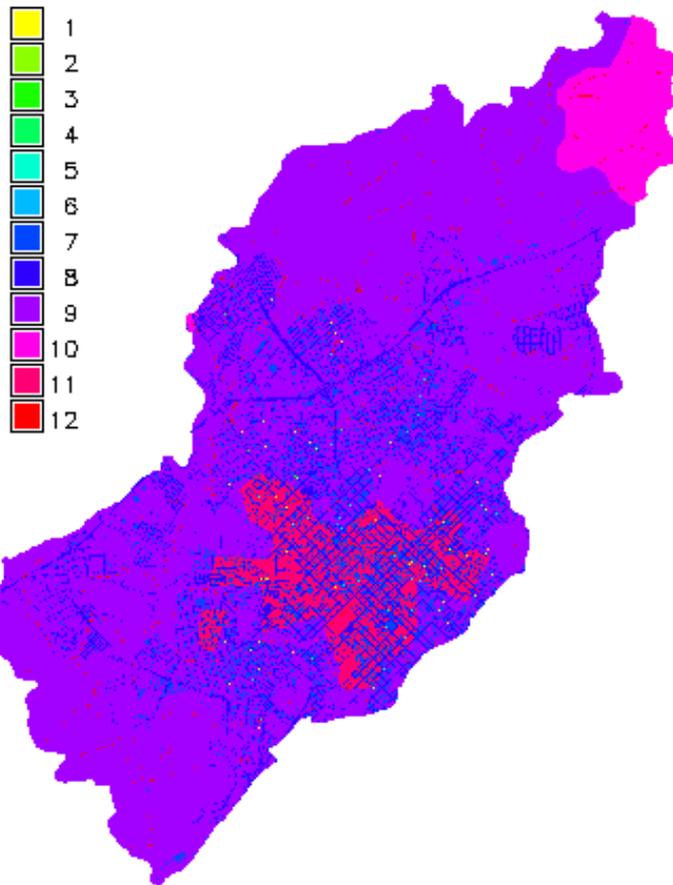


Figura 5-26 - Mapa de tipo de suelo con las modificaciones agregadas.

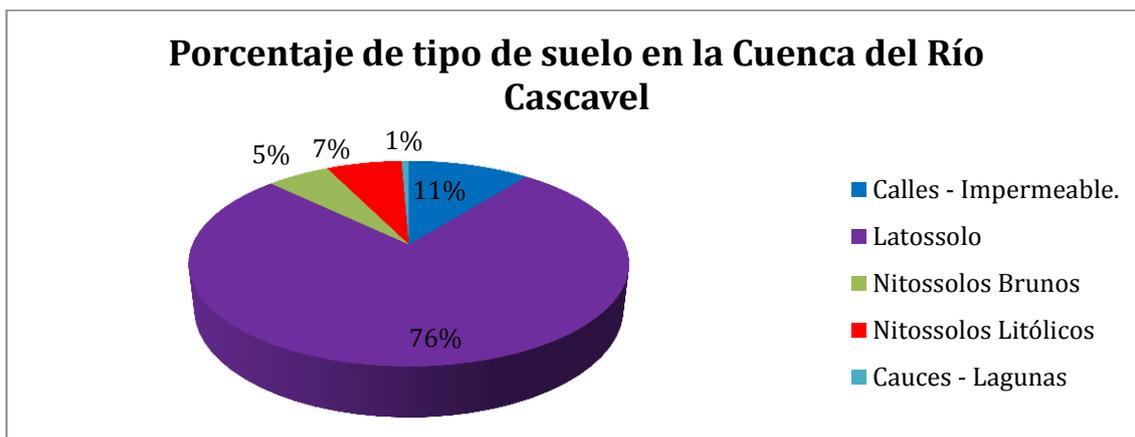


Figura 5-27 - Porcentaje de sector ocupado por cada tipo de suelo adoptado en la Cuenca del Río Cascavel.

5.1.4. Uso de suelo

Para determinar el uso de suelo para la creación del modelo en TREX se utilizó el mapa desarrollado por [Gomes \(2014\)](#). Este mapa divide el uso de suelo en cinco tipos (Figura 5-28): vegetación arbórea (referencia 1), vegetación rastrera (referencia 2), suelo

MODELACIÓN HIDROLÓGICA-HIDRÁULICA TOTALMENTE DISTRIBUIDA DE UNA CUENCA FUERTEMENTE ANTROPIZADA – CASO DEL RÍO CASCAVEL (GUARAPUAVA/PR, BRASIL)

expuesto (referencia 3), áreas húmedas (referencia 4) y construido (referencia 5). Luego, en la Figura 5-29 se encuentra representado las proporciones, en porcentaje, de los distintos usos de suelo presentes en la cuenca del Río Cascavel.

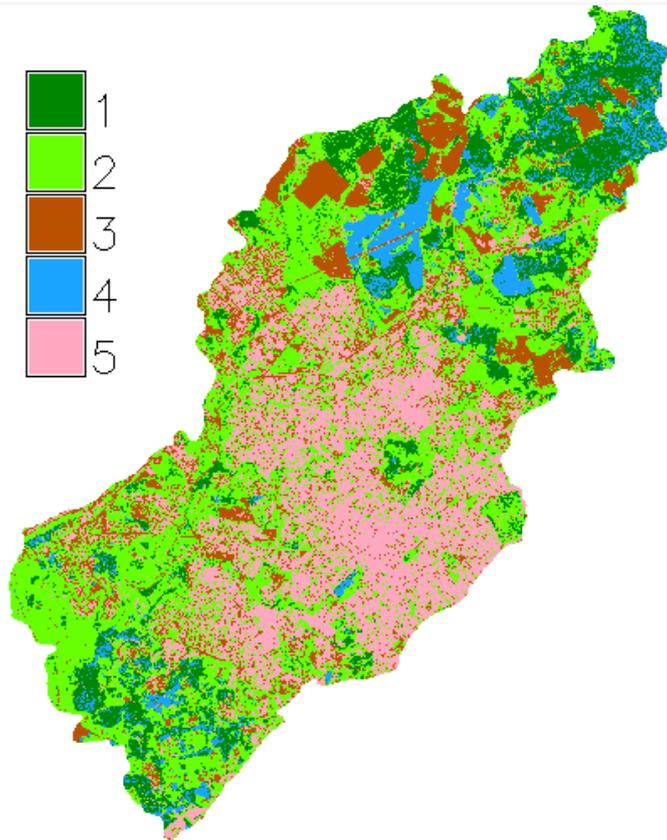


Figura 5-28 - Mapa de uso de suelo obtenido para la modelación en TREX.

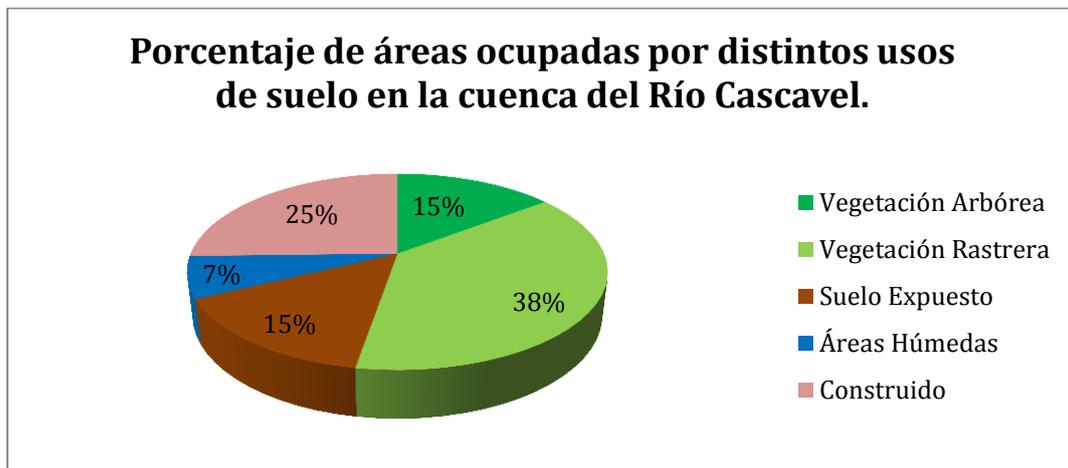


Figura 5-29 - Porcentaje de sector ocupado por cada uso de suelo adoptado en la Cuenca del Río Cascavel.

La clasificación realizada por [Gomes \(2014\)](#) identifica a las áreas mencionadas de la siguiente manera:

- Vegetación arbórea/arbustiva: vegetación compuesta con árboles y/o arbusto.

- Vegetación rastrera: áreas con vegetación gramínea y/o sectores agrícolas temporarios.
- Lagos/Bañados/Áreas Húmedas: áreas con lagunas, y/o bañados, y áreas con suelos húmedos sujetos a inundaciones.
- Suelo expuesto: áreas con suelos desprovistos de cobertura vegetal.
- Área Construida: áreas con presencia de residencias, edificios institucionales, galpones, industrias, vías pavimentadas, etc.

5.2. Modelo realizado en TREX

Debido al tamaño de la cuenca a modelar y a la decisión de aumentar la resolución de los mapas de ingreso para la modelación en el área urbana se dividió la cuenca en distintas subcuencas para agilizar el trabajo en TREX y evitar el gran costo computacional de modelar la cuenca completa.

De esta manera, se dividió la cuenca en 5 subcuencas urbanas, cuya resolución es de 5,0 m y en 3 subcuencas rurales que cuentan con una resolución de 30 m.

En TREX solo se modelará el escurrimiento superficial con sus respectivos procesos hidrológicos que conlleva: precipitación, interceptación vegetal, infiltración y escurrimiento en superficial en superficie. Sin embargo, no se modelará el escurrimiento en cauces; para los caudales que llegan a una celda en donde se encuentra un cauce, existirá un tipo especial de suelo artificial, en el cual infiltra todo el flujo que llega hasta esta celda. Luego, en SWMM se modelarán los cauces con conductos. De tal forma, que las subcuencas en TREX no se encuentran vinculadas, sino que se vinculan por los conductos/cauces del único modelo de SWMM.

En la Figura 5-30 se encuentra esquematizada la división de las subcuencas en TREX y como lo infiltrado en las celdas “cauces” en TREX se ingresa a los nodos cauces de SWMM y allí se modela de manera completa la cuenca.

Cuatro de las subcuencas divididas se encuentran relevadas en trabajos realizados por UNICENTRO ([Gomes, 2014](#), [Oliveira, 2011](#)). Estas subcuencas son: arroyo Engenho, arroyo Carro Quebrado, arroyo Barro Preto (subcuencas urbanas) y arroyo Monjolo (subcuenca rural). Las otras tres subcuencas fueron divididas de forma tal de tener tamaños aproximadamente iguales a las anteriormente mencionadas y luego, la subcuenca rural sur comprende desde el punto de cierre de la cuenca del Río Cascavel hasta el punto de medición de caudales.

Para las divisiones de estas subcuencas se utilizó el software GRASS GIS y se fueron delimitando así todos los mapas anteriormente mencionados: modelo digital de elevación, tipo de suelo y uso de suelo.

De esta forma, las subcuencas quedaron divididas de la siguiente forma:

- Subcuenca urbana arroyo Barro Preto.

MODELACIÓN HIDROLÓGICA-HIDRÁULICA TOTALMENTE DISTRIBUIDA DE UNA CUENCA FUERTEMENTE ANTROPIZADA – CASO DEL RÍO CASCAVEL (GUARAPUAVA/PR, BRASIL)

- Subcuenca urbana arroyo Carro Quebrado.
- Subcuenca urbana arroyo Engenho.
- Subcuenca urbana Norte.
- Subcuenca urbana Centro.
- Subcuenca rural arroyo Monjolo.
- Subcuenca rural Norte.
- Subcuenca rural Sur.

Con la delimitación realizada (Figura 5-31), cada subcuenca tiene las siguientes características (Tabla 5-5):

Tabla 5-5 - Tamaño de las distintas subcuencas utilizadas.

Subcuenca	Resolución	Área [km ²]	Celdas Activas
Arroyo Barro Preto	5 m x 5 m	3,30	132.114
Arroyo Carro Quebrado	5 m x 5 m	11,42	457.004
Arroyo Engenho	5 m x 5 m	8,52	340.751
Urbana Centro	5 m x 5 m	13,30	531.850
Urbana Norte	5 m x 5 m	9,12	364.652
Arroyo Monjolo	30 m x 30 m	14,30	15.881
Rural Norte	30 m x 30 m	6,43	7.139
Rural Sur	30 m x 30 m	12,25	13.616

En la Figura 5-31 el punto amarillo indica la estación pluviográfica-fluviográfica “Foz do Río Cascavel” utilizada para calibrar el modelo.

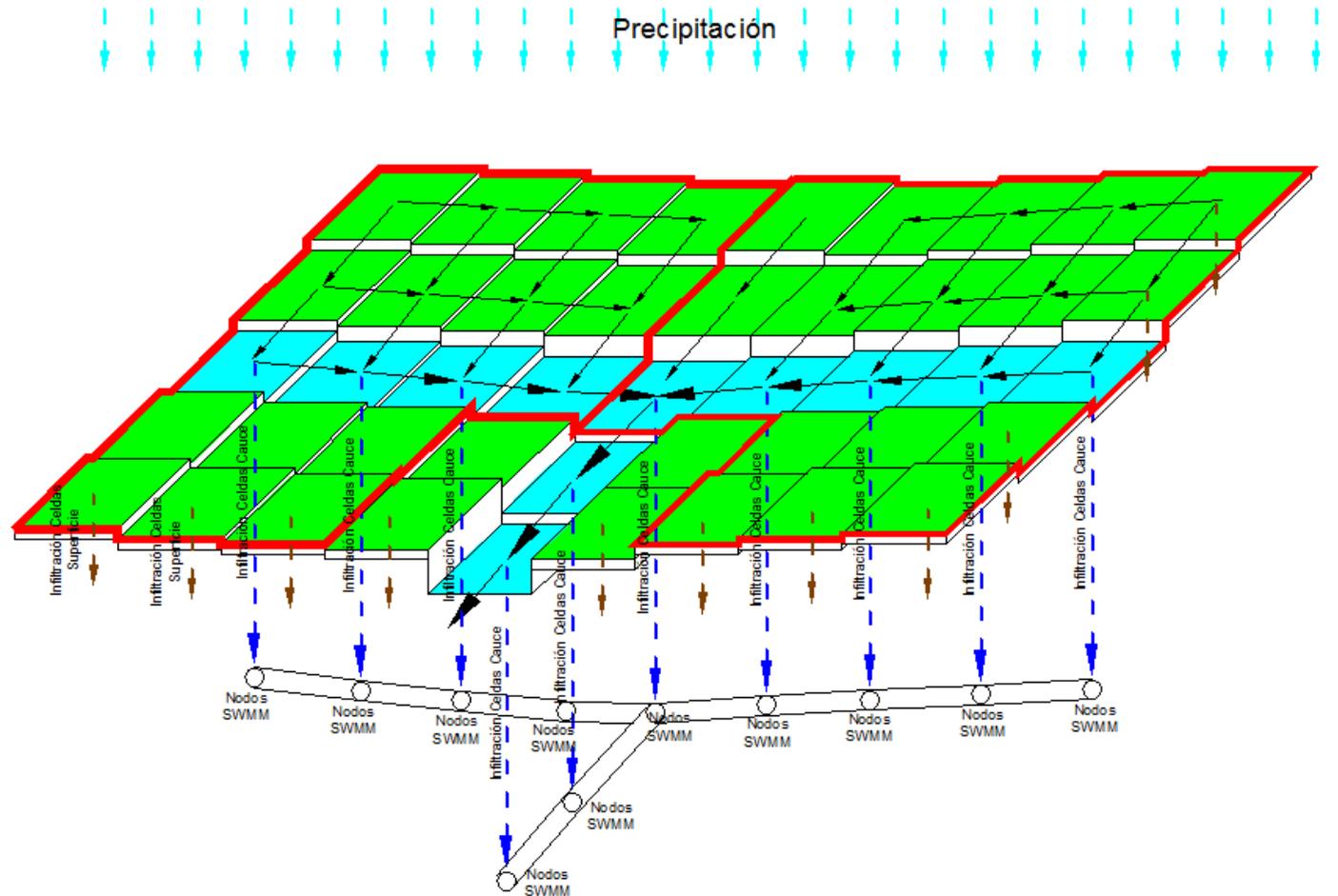


Figura 5-30 – Esquema del acoplamiento del modelo TREX y SWMM. En verde las celdas correspondientes al escurrimiento superficial en TREX, en celeste las celdas correspondientes a los cauces. Con línea roja las subcuencas modeladas en TREX. En azul el caudal infiltrado en las celdas cauces que es ingresado a los nodos cauces de SWMM.

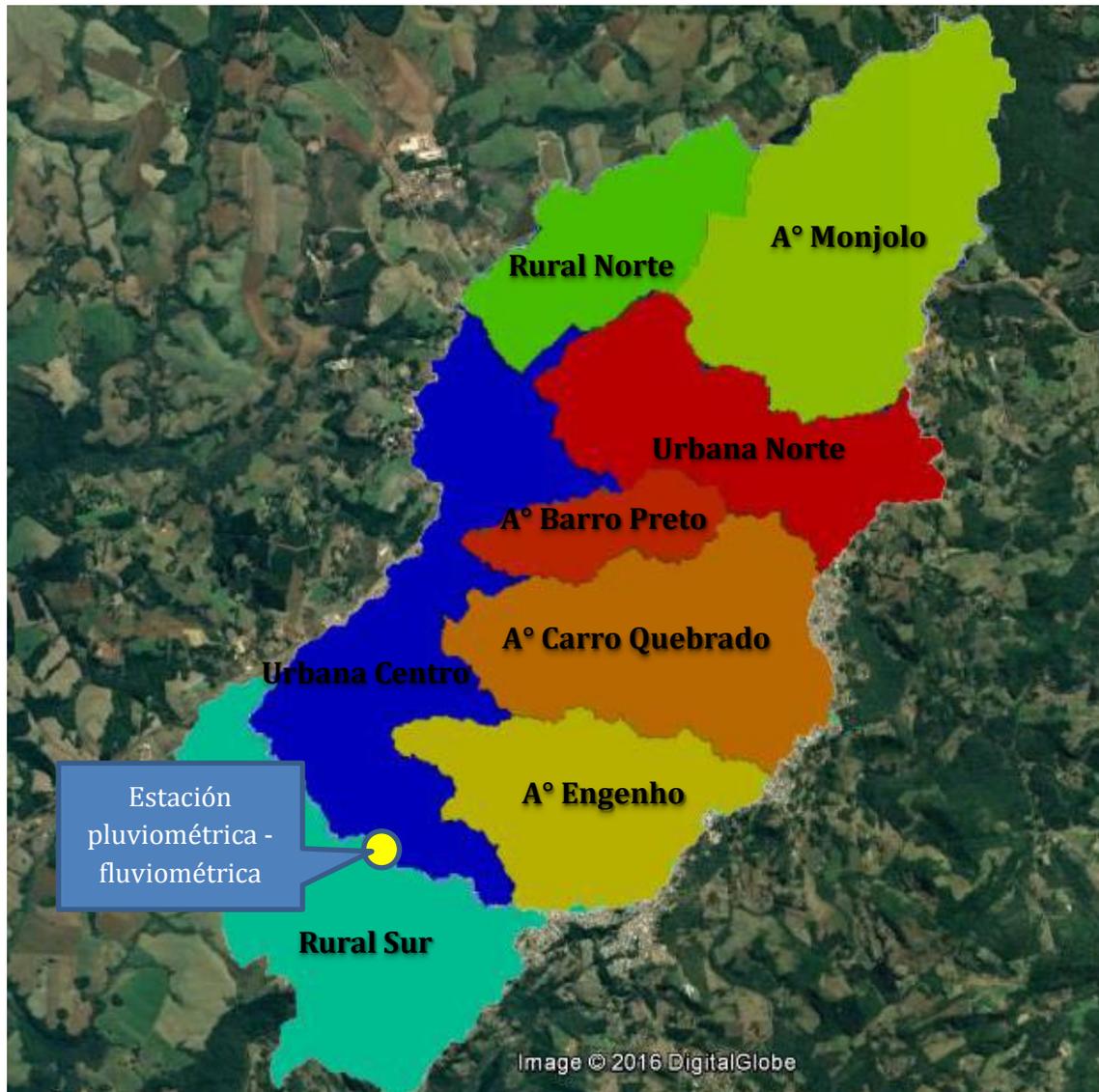


Figura 5-31 - División de la Cuenca del Río Cascavel en distintas subcuencas. El punto amarillo indica la ubicación de la estación pluviométrica - fluviométrica Foz do Rio Cascavel.

5.2.1. Corrección del modelo digital de elevación

Una vez delimitada cada una de las subcuencas, se realizó la corrección del modelo digital de elevación. Estas correcciones estuvieron causadas por los siguientes motivos:

TREX simula el flujo en dos direcciones: direcciones normales a los lados de las celdas, pero hay veces que el flujo debería dirigirse en diagonal. Esto provoca un acumulamiento de agua en las celdas lo que ralentiza el cálculo numérico en TREX (Figura 5-32).

Falsas barreras físicas debidas a errores en la interpolación del modelo digital de elevación por rutas, ferrocarriles o construcciones.

Bocas de tormenta que quedan emplazadas en “puntos altos” debido a problemas en la interpolación o por los puntos medidos.

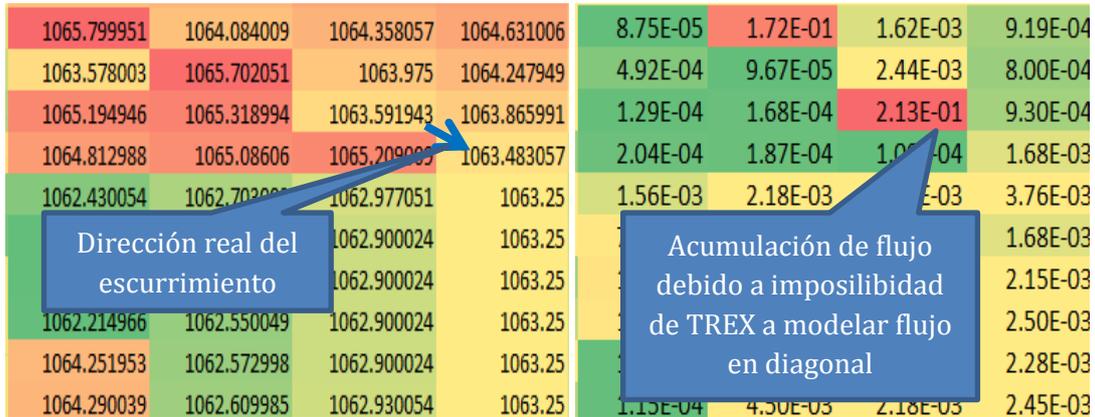


Figura 5-32 - A la izquierda sector del modelo digital de elevación - A la derecha sector del mapa de escurrimiento superficial.

Acumulamiento de flujos dentro de barreras. Esto aparece dentro de las manzanas del parcelamiento, donde pueden existir construcciones (barreras que se elevó el MDE 2,0 m) que interceptan el flujo provocándose aquí también una elevación del mismo (Figura 5-33).



Figura 5-33 - A la izquierda sector del modelo digital de elevación - A la derecha sector del mapa de escurrimiento superficial.

Para subsanar los inconvenientes anteriormente mencionados se simuló cada subcuenca con una precipitación uniforme y se visualizaron los mapas de salida de escurrimiento superficial, de esta forma se identificaron cada uno de los sectores con inconvenientes y se corrigieron de manera manual sucesivamente.

Para el inconveniente número 1, la corrección se realizó de manera automática elaborando un software especialmente diseñado para dicho inconveniente. Este software identifica los casos en donde se producen acumulamientos de escurrimiento debido a que TRES no simula flujo en diagonal y modifica la celda adyacente a donde se produce el almacenamiento para evitar este inconveniente. La modificación consiste en reemplazar el valor de elevación de la celda "alta" por el promedio de elevaciones de la celda origen del

MODELACIÓN HIDROLÓGICA-HIDRÁULICA TOTALMENTE DISTRIBUIDA DE UNA CUENCA FUERTEMENTE ANTROPIZADA – CASO DEL RÍO CASCAVEL (GUARAPUAVA/PR, BRASIL)

flujo y de la celda que debería recibir el escurrimiento si se modelara el flujo en diagonal. A continuación, un esquema de lo realizado por el software (Figura 5-34 y Figura 5-35).

	j-1	j	J+1
i-1	100	99	100
i	102	98	99
i+1	102	102	97

Figura 5-34 - Caso de modelo digital de elevación previo a corrección automática. En amarillo, la celda de elevación de origen del escurrimiento, en azul celda que debería recibir el escurrimiento en diagonal y en rojo celda “alta” a corregir.

	j-1	j	J+1
i-1	100	99	100
i	102	98	97.5
i+1	102	102	97

Figura 5-35 - Caso de modelo digital de elevación previo a corrección automática. En amarillo, la celda de elevación de origen del escurrimiento, en azul celda que debería recibir el escurrimiento en diagonal y en verde celda “alta” corregida.

De esta forma, se realizó el trabajo para cada subcuenca analizando distintos factores como ser, volumen de agua en el modelo al final de la precipitación, números de correcciones realizadas, volumen de agua en celdas con más de 0,02 cm de nivel de agua, etc. A medida que se realizaban cada vez más correcciones, el modelo en TREX requería menor costo computacional, lo que también fue favorable para las modelaciones.

Por ejemplo, en la Tabla 5-6, se presentan los resultados de las correcciones realizadas en la subcuenca del arroyo Barro Preto.

En la primera columna, se presenta el número de simulaciones consecutivas que se realizaron de la misma subcuenca. La primera simulación se realizó con el modelo digital de elevación “crudo”, sin realizarle ninguna corrección.

En la segunda columna, se presenta el número de celdas en las cuales se corrigieron (de forma manual y automática) los valores de las cotas de elevación en cada modelación, donde se observaban los inconvenientes anteriormente descriptos. Esto se hizo con la ayuda del mapa de escurrimiento superficial de la simulación y el modelo digital de elevación. Lo anterior, se realizó fijando un tiempo de simulación constante para lograr el escurrimiento natural de la cuenca y poder identificar aquellos sectores donde el agua quedaba “retenida” artificialmente ya por la existencia de barreras ficticias, porque la dirección del flujo debía ser en forma diagonal o por errores en el modelo digital de elevación.

A partir de dicha simulación, se tomaron como referencia algunos parámetros para poder comparar el desempeño del modelo digital de elevación en las sucesivas modelaciones al realizar las correcciones en el mismo. De esta forma, se tomaron como parámetros las siguientes variables, que deberían disminuir a manera que se realizaban las siguientes correcciones.

- Volumen final en la superficie respecto a volumen total precipitado [%]: corresponde al volumen de agua que queda en la superficie de la cuenca luego de realizada la modelación (con un tiempo de simulación fijado) dividido el volumen total de agua precipitado.

- Volumen de agua en celdas con más de 0,02 cm. [m³]: De la misma manera que el parámetro anterior, se determinó el volumen de agua que quedaba en la superficie de la cuenca terminada la modelación.
- Volumen en celdas con más de 0,02 cm sobre volumen total precipitado [%]: El mismo parámetro anterior determinado en forma porcentual.
- Variación de volumen por corrección realizada [m³]: este parámetro relaciona la variación de volumen infiltrado entre simulaciones sucesivas dividido el número de correcciones realizadas previo a la nueva modelación. Este parámetro sirve para dar una idea de hasta qué punto es conveniente seguir realizando correcciones al MDE.

Con los distintos parámetros de referencia se pudo analizar hasta qué punto las correcciones realizadas tenían influencia en los resultados finales.

Tabla 5-6 - Variables analizadas según correcciones al MDE de la subcuenca arroyo Barro Preto.

Simulación	Número de Correcciones realizadas con respecto a modelación anterior.	Volumen Infiltrado [m ³]	Volumen final en la superficie respecto a volumen total precipitado [%]	Volumen de agua en celdas con más de 0,02 cm. [m ³]	Volumen en celdas con más de 0,02 cm sobre volumen total precipitado [%]	Variación de volumen por corrección realizada [m ³]
1°		15610	18%		18%	
2°	300	16607	14%	2859	12%	---
3°	259	17604	10%	1906	8%	- 3,68
4°	215	18517	8%	1472	6%	- 2,02
5°	500	19570	6%	884	4%	- 1,18
6°	219	19634	5%	664	3%	- 1,01
7°	122	19918	5%	554	2%	- 0,90
8°	60	19987	5%	510	1%	- 0,73

De esta forma, se adoptó como criterio para finalizar la corrección del modelo digital de elevaciones, que existiera tan solo un 5 % de volumen de agua en la cuenca luego de la precipitación con respecto al volumen total precipitado, ya que a partir de este valor las correcciones realizadas no modificaban en demasía los valores de volumen de agua finales en la cuenca y por ende los volúmenes de agua infiltrados en la cuenca.

A continuación (Figura 5-36 y Figura 5-37), algunos de los gráficos que representan lo anterior, para la cuenca del arroyo Barro Preto.

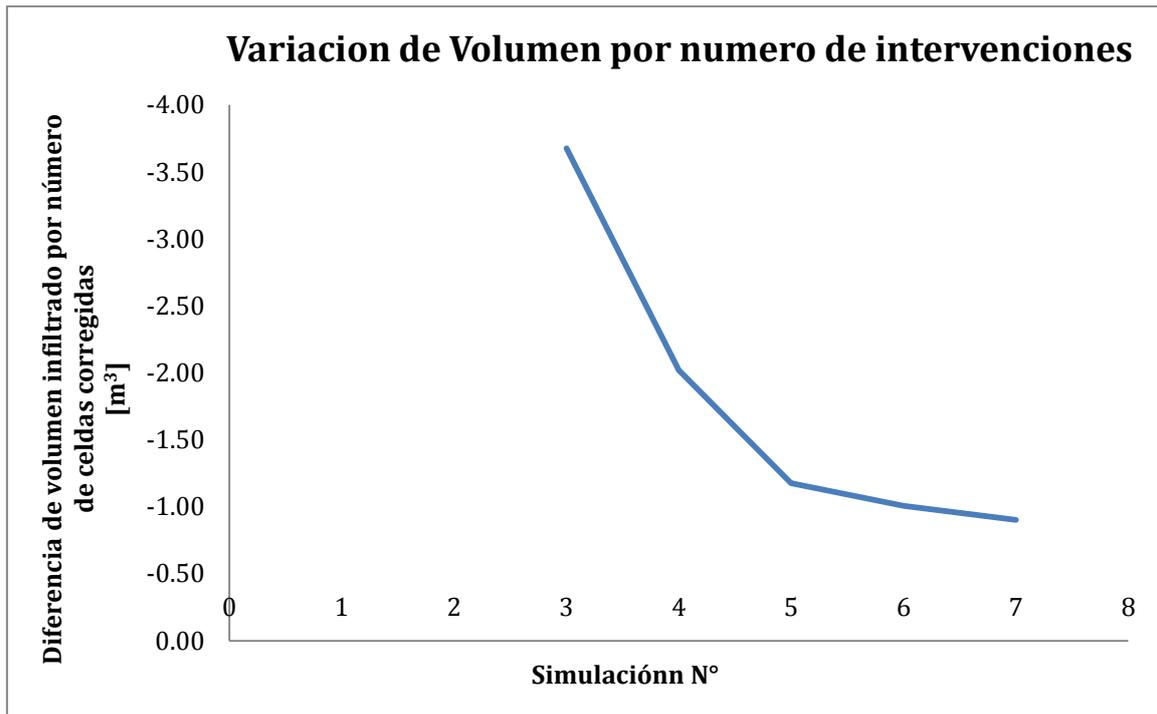


Figura 5-36 - Variación de volumen infiltrado según cantidad de celdas intervenidas. Subcuenca arroyo Barro Preto.

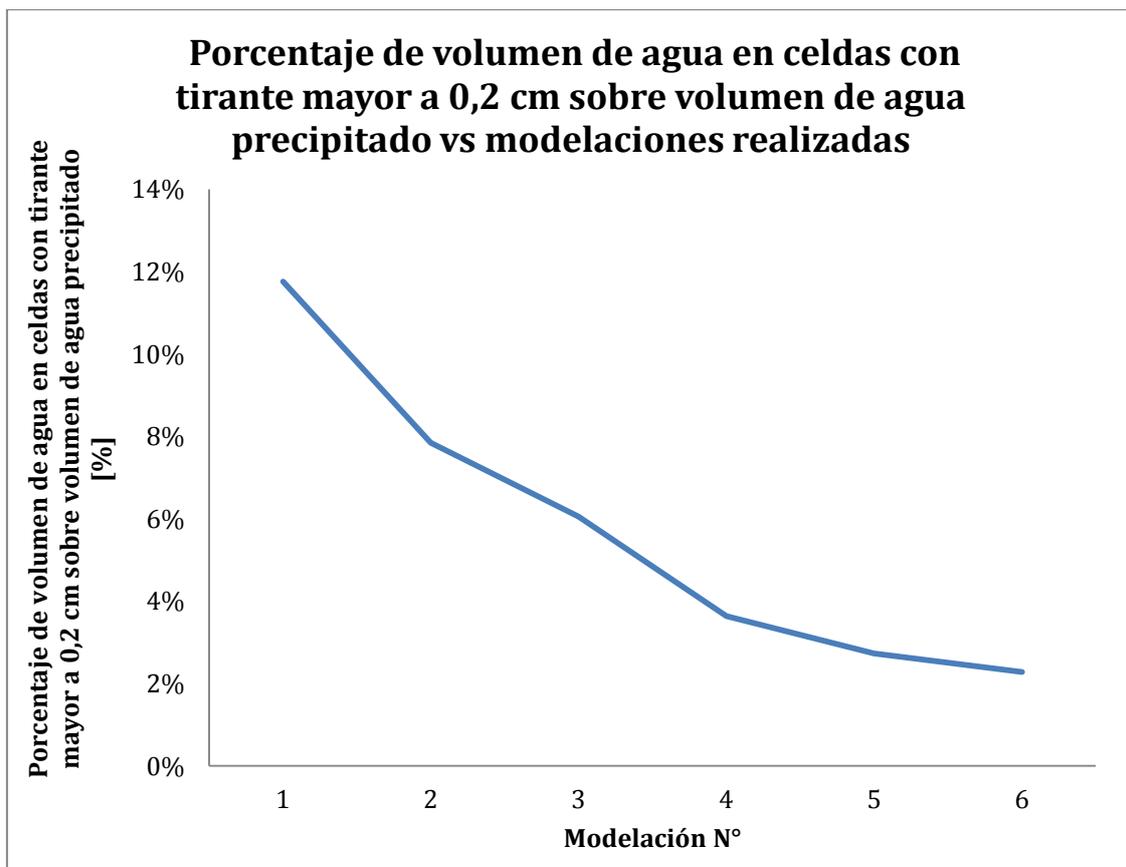


Figura 5-37 - Volumen de agua en celdas con tirante mayor a 0,2 cm con respecto a volumen precipitado. Subcuenca arroyo Barro Preto.

En total, en cada subcuenca se realizaron las siguientes correcciones (Tabla 5-7):

Tabla 5-7 - Celdas corregidas en cada subcuenca.

Subcuencas	Celdas corregidas
Arroyo Barro Preto	1.675
Arroyo Carro Quebrado	4.123
Arroyo Engenho	3.562
Urbana Norte	3.247
Urbana Centro	3.450

5.3. Modelo realizado en SWMM

Para realizar la simulación en SWMM, se realizó un solo modelo de la cuenca entera (a diferencia de TREX que se dividió en subcuencas) pero identificando los elementos que componen al modelo (nodos, cauces y conductos), dependiendo de la subcuenca que pertenece.

Como se mencionó anteriormente, en Guarapuava no hay información acerca de la ubicación y las dimensiones de los conductos, por lo que los mismos fueron creados con su traza coincidente con los ejes de las calles. De esta forma, se desarrolló una red tipo malla cerrada (looped network), es decir una red en donde el agua puede tomar más de un camino entre dos puntos dependiendo la característica del flujo, pendiente de conductos, etc. De esta forma los conductos pluviales descargan a los conductos cauces. Esto fue realizado de esta manera, debido a la densidad de bocas de tormentas existente en la localidad, donde prácticamente en todas las manzanas existe alguna. Adicionalmente, se crearon los conductos pluviales coincidentes con arroyos o escurrimientos que se encuentran entubados.

Esta red de conductos pluviales que descargan a los nodos cauces, se desarrolló con el fin de no establecer arbitrariamente la ubicación y sentido de los conductos. Con una malla de este tipo y la utilización del método de cálculo de la onda dinámica en SWMM, el flujo se dirigirá según el gradiente hidráulico predominante. Por lo anterior, en cada bocacalle, existe un nodo de conexión. Se creó un software ad-hoc mediante Octave ([Eaton et al. 1997](#)) que utiliza los datos del trazado de las calles para identificar las coordenadas de cada bocacalle. Luego, el mismo software determina según las coordenadas la cota de dicho nodo y por último dependiendo de la cercanía entre los nodos se genera la red de conductos (Figura 5-38). Finalmente, el mismo programa escribe los datos de ingreso a SWMM con el formato necesario para poder ser utilizado para la modelación. A los conductos se les determinó la longitud (dato necesario para ingresar al modelo) con la ayuda de las coordenadas de cada nodo y luego se les definió arbitrariamente a los nodos una altura máxima de 2,0 metros y a los conductos un diámetro inicial de 600 mm. La elección de la dimensión de los conductos de 600 mm se basa en las observaciones realizadas en el lugar por el Profesor Leandro Vestena y su equipo de UNICENTRO teniendo en cuenta que no existen planimetría ni registros de ubicación y sección de los conductos. Luego corriendo las distintas modelaciones se agrandaron aquellos conductos en los cuales la capacidad se veía excedida, de manera tal

MODELACIÓN HIDROLÓGICA-HIDRÁULICA TOTALMENTE DISTRIBUIDA DE UNA CUENCA FUERTEMENTE ANTROPIZADA – CASO DEL RÍO CASCAVEL (GUARAPUAVA/PR, BRASIL)

que no haya conductos a presión ya que no se modela el fenómeno de reflujo por las nodos o bocas de tormenta.

Teniendo en cuenta las coordenadas donde existen bocas de tormenta (relevadas con google Street view) se creó un nodo de aporte al modelo por cada boca de tormenta. Se creó nuevamente un software para identificar las coordenadas de las bocas de tormenta y determinar la cota de elevación de las mismas (extraídas del MDE). El mismo software crea los conductos auxiliares que unen las bocas de tormenta con los nodos de los conductos que tienen su trazo por el eje de la calle. Esta conexión se realiza automáticamente dependiendo un umbral de distancia entre un nodo de boca de tormenta y un nodo de conducto. De la misma manera que lo explicado en el párrafo anterior, se escriben con el software los distintos elementos del archivo input de SWMM para que permita modelar lo anterior. En este punto, también se crearon los “inflows” de cada boca de tormenta, es decir, se indica que nodos tendrán aportes y como se llama la serie de datos que representa dicho aporte.

De manera similar a las bocas de tormenta, se realiza con los nodos cauces diferenciados en el mapa de tipo de suelo en TREX. En primer lugar, se identifican las coordenadas de dichas celdas, se crean entonces los nodos de cada cauce. En segundo lugar, se crean los conductos de unión de cada nodo teniendo en cuenta las distancias entre sí y se determinan sus características principales (longitud) (Figura 5-39).

Por último, se generó un software para realizar los conductos de conexiones entre la red cerrada de drenaje y los nodos de los cauces. Para ello, la unión se realiza respetando un umbral de distancia (menor a 200 m). Es decir, si un nodo auxiliar de la red cerrada de drenaje se encuentra a menos de 200 m de distancia de un nodo de cauce se crea un conducto de unión entre el nodo de la red de drenaje pluvial y el nodo cauce.

Se realizaron revisiones y correcciones manuales de los elementos para evitar que se produzcan “lomas” indeseadas en los cauces debidos a errores del MDE. Ya que al indicar de forma automática las cotas de los nodos de los distintos elementos, se generan cotas que forman “barreras” en el flujo de cauces, canales y conductos produciéndose almacenamientos temporales de agua irreales que impiden el libre flujo a través de los distintos elementos. En algunos casos, estas barreras impedían de forma temporal el flujo aguas abajo en el modelo, ya que al avanzar la modelación la cota de agua superaba dicha barrera produciéndose escurrimiento aguas abajo de la misma. Pero, en otros casos, existían errores tan graves que impedían totalmente el flujo aguas abajo en toda la duración de la modelación. En ambos casos, se verificó si en realidad existiesen dichas barreras pero no fue así, por lo que se corrigieron para evitar estas demoras en el flujo o almacenamientos de agua dentro del modelo.

Adicionalmente, en cada modelación se fueron revisando las capacidades de los conductos para evitar que los mismos trabajen a presión, existiendo en tramos conductos con diámetros mayores a 1,0 metro. Por otro lado, en aquellos cauces que atravesaban alcantarillas o pequeños tramos de conducción con sección identificada también se agregó en el modelo.

También se agregaron manualmente aquellos elementos de embalse que representan las lagunas que se encuentran dentro de la cuenca.

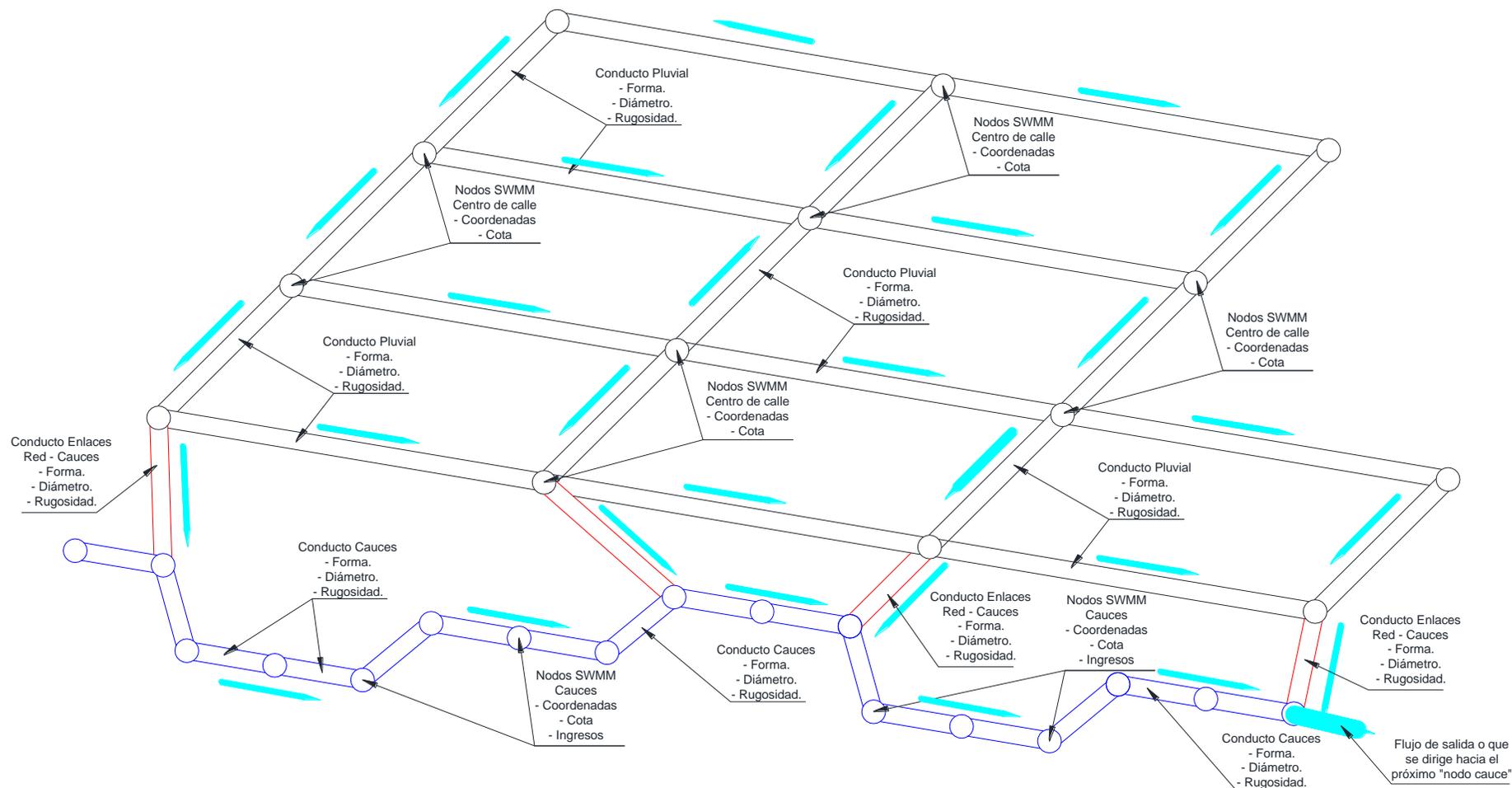


Figura 5-38 – Esquema de red de drenaje pluvial utilizada. Se trata de una malla cerrada (looped network) compuesta por los conductos pluviales bajo las calles, los cuales descargan a los nodos cauces. En negro los nodos y conductos coincidente con las calles. En azul nodos y conductos coincidentes con los cauces y en rojo los conductos enlace. En celeste se indica el sentido del flujo que dependerá de las cotas de los nodos.

MODELACIÓN HIDROLÓGICA-HIDRÁULICA TOTALMENTE DISTRIBUIDA DE UNA CUENCA FUERTEMENTE ANTROPIZADA – CASO DEL RÍO CASCAVEL (GUARAPUAVA/PR, BRASIL)

Los elementos que representan las bocas de tormenta y los nodos de cauces, fueron identificados de acuerdo a la subcuenca que pertenece cada uno. De esta forma, los elementos existentes en el modelo completo y en cada subcuenca se encuentran en la Tabla 5-8 y Tabla 5-9.

Finalmente, quedó conformado el modelo en SWMM como se puede ver en detalle en la Figura 5-40 y el modelo completo en la Figura 5-41.

Cabe mencionar que al realizar las distintas modelaciones de los eventos seleccionados se encontraron inestabilidades numéricas en SWMM en aquellos sectores donde existía una pendiente muy baja (o nula) y confluían distintos cauces o conductos (en general cuando confluían conductos al cauce principal). Esto obligó a corregir manualmente aquellos sectores de manera tal de interpolar las elevaciones de los nodos extremos a estos sectores para evitar tramos sin pendientes. De esta forma se redujeron notablemente las inestabilidades numéricas.

Cabe aclarar, que las simplificaciones y adaptaciones que se realizaron en la red de drenaje en cuanto a distribución, tamaño y pendiente de los conductos, pueden generar diferencia entre los resultados obtenidos y los reales. Ya que, por ejemplo, la respuesta de la red de drenaje creada puede que no sea igual a la real, debido a que el flujo puede viajar por caminos más directos a los cauces o no, o en conductos de mayor o menor tamaño a los adoptados en este trabajo.

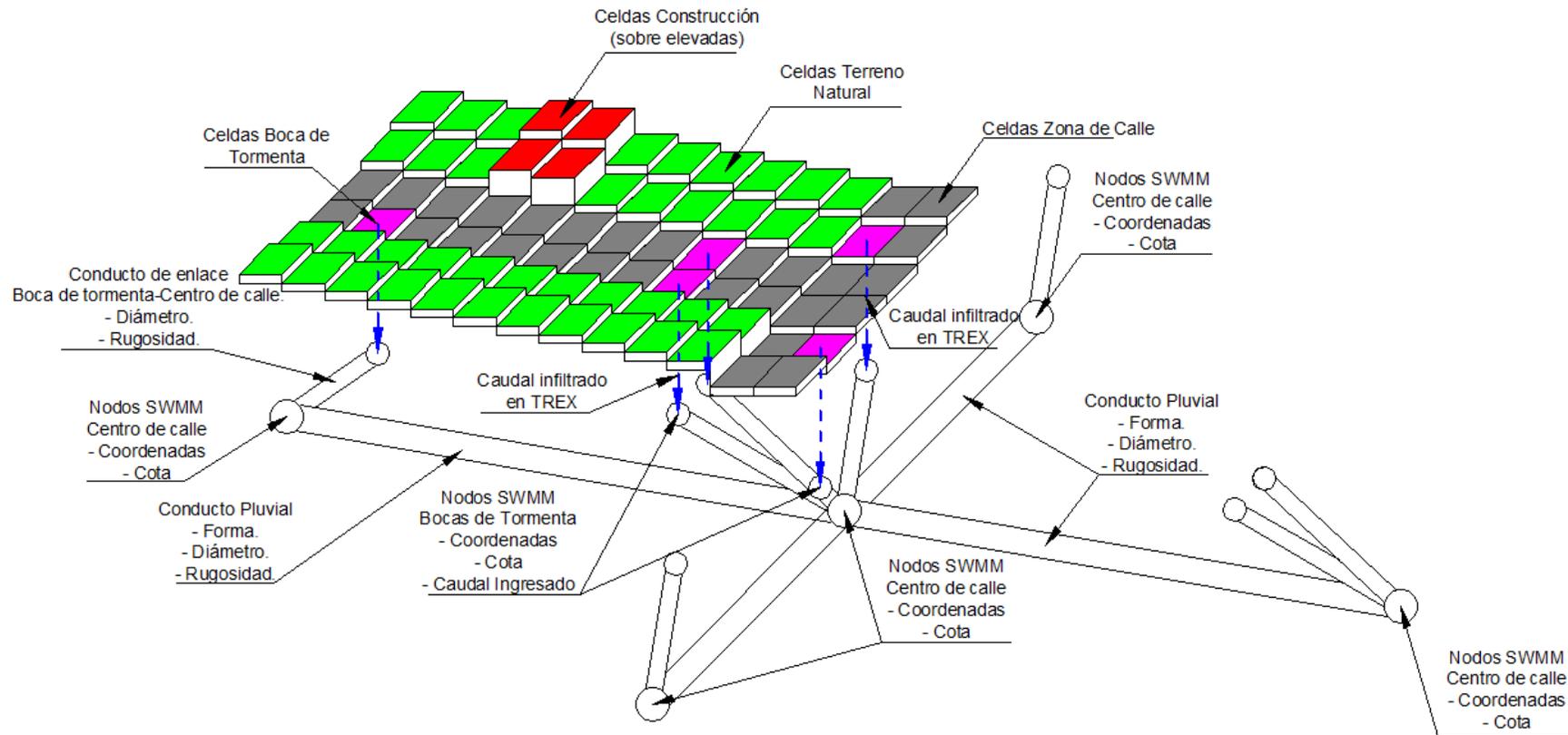


Figura 5-39 – Esquema básico de la relación entre el modelo TREX y SWMM en sector urbano. Transferencia de los caudales captados por las bocas de tormentas en el modelo SWMM.

MODELACIÓN HIDROLÓGICA-HIDRÁULICA TOTALMENTE DISTRIBUIDA DE UNA CUENCA FUERTEMENTE ANTROPIZADA – CASO DEL RÍO CASCAVEL (GUARAPUAVA/PR, BRASIL)

Tabla 5-8 - Características principales del modelo SWMM para la cuenca completa.

Elemento	Cuenca Completa
Nodos de conexión de conductos en la calle (red cerrada).	3.494
Conductos que simulan las cañerías bajo calle.	5.285
Conductos de conexión entre las bocas de tormenta y los nodos de los conductos en calle	4.211
Nodos correspondientes a bocas de tormenta.	4.211
Nodos correspondientes a celdas cauces.	11.095
Datos de ingresos de caudal al sistema	15.306
Conductos de enlace entre los nodos cauces	11.095
Embalses	1

Tabla 5-9 - Cantidad de nodos cauces y bocas de tormenta en las distintas subcuencas.

	Nodos Boca de tormenta	Nodos Cauces
Arroyo Barro Preto	539	690
Arroyo Carro Engenho	1.137	1.239
Arroyo Carro Quebrado	1.783	1.787
Urbana Norte	231	3.004
Urbana Centro	521	2.797
Arroyo Monjolo	0	313
Rural Norte	1	703
Rural Sur	0	562

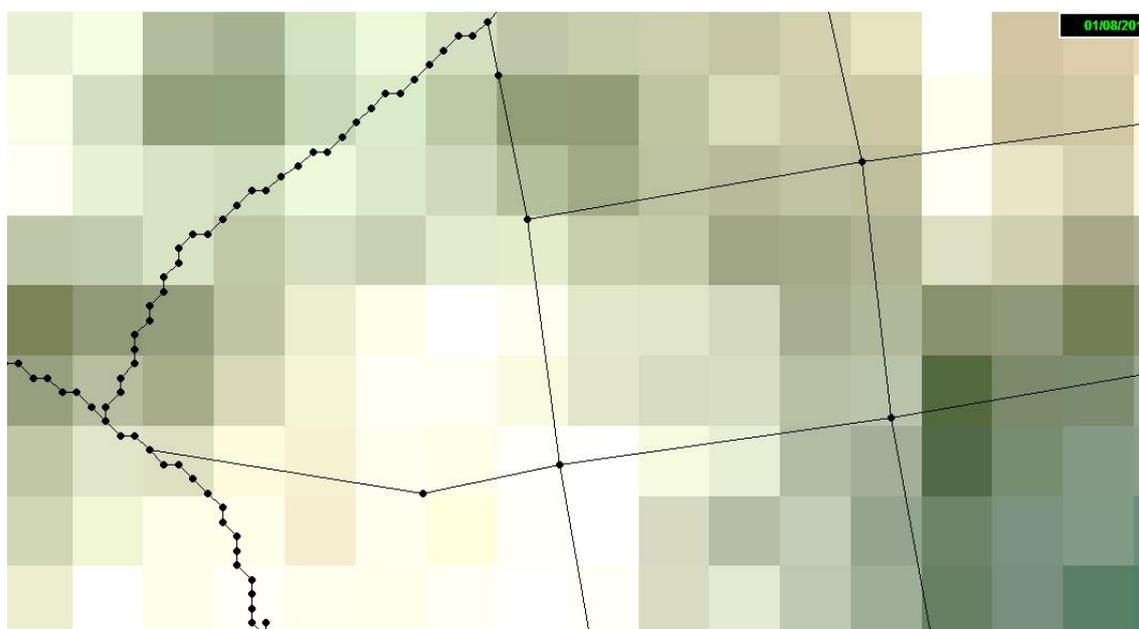


Figura 5-40 - Detalle de un sector del modelo en SWMM.

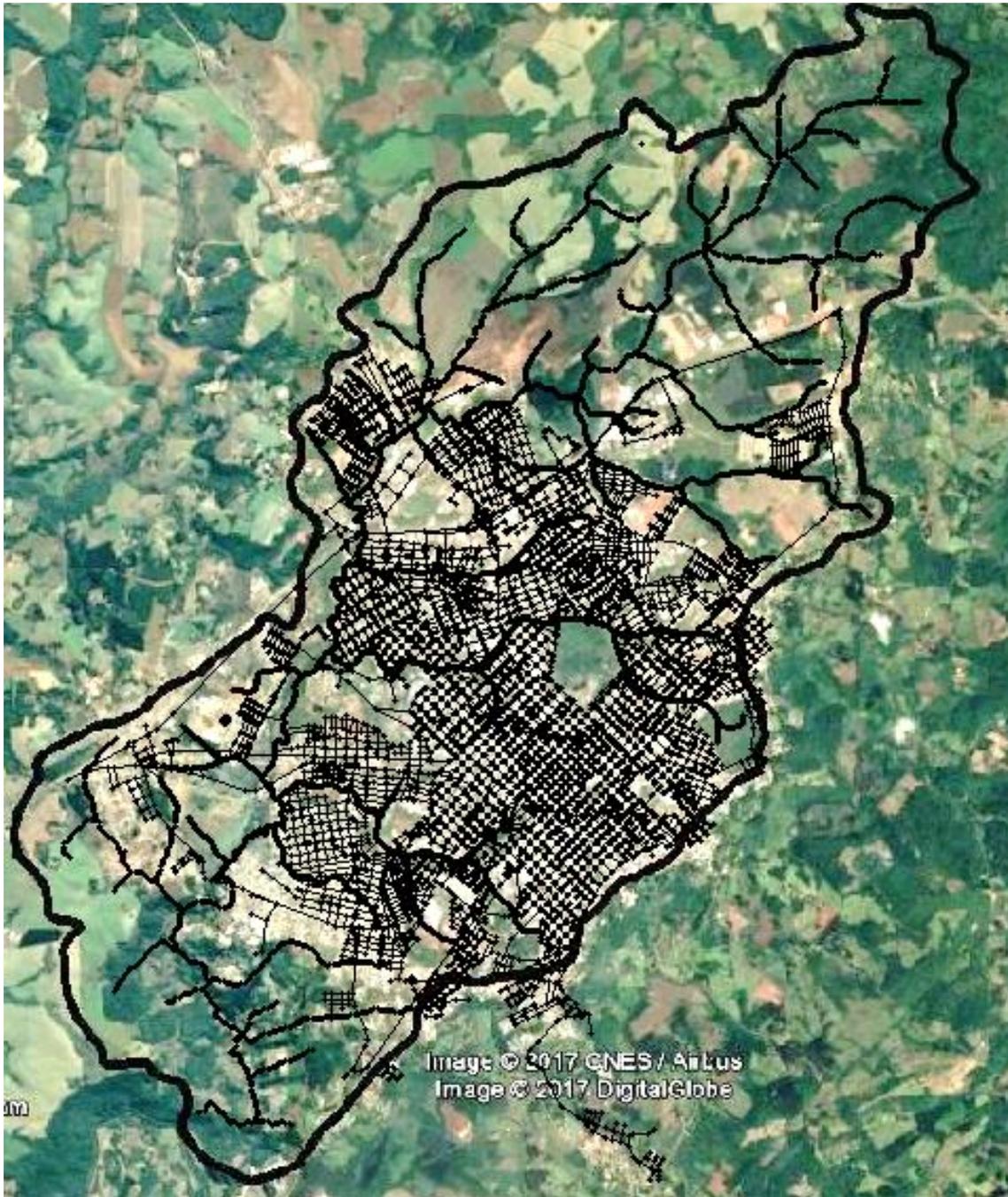


Figura 5-41 - Visualización del modelo SWMM de toda la cuenca del Río Cascavel.

Capítulo 6: Aplicación y resultados

6.1. Ideas generales

La calibración de un modelo consiste en lograr un ajuste satisfactorio entre los caudales observados y calculados (simulados), mediante el cambio en los valores de los parámetros de mayor influencia, aun de aquellos considerados conocidos ([Palacios, 1986](#)).

La validación de modelo consiste en medir su capacidad predictiva mediante la comparación de los caudales observados y calculados (simulados) con los parámetros determinados en la fase de calibración, pero en un periodo diferente del utilizado en la calibración. Generalmente el ajuste entre los caudales calculados y observados obtenidos durante la validación es menos satisfactorio que el obtenido en la calibración, pero es más representativo de la exactitud de las predicciones que se hagan con el modelo ([Palacios, 1986](#)).

6.2. Calibraciones de eventos

Según [Beven \(2000\)](#) citado por [Davila Ordoñez \(2012\)](#), la calibración de un modelo tiene las mismas características de un ajuste por regresión múltiple, en donde los parámetros óptimos serán tales que minimicen los errores residuales, pero si hay residuales implica que existe incertidumbre en el modelo calibrado. En la calibración de un modelo hidrológico, el hidrólogo debe especificar los valores de los parámetros del modelo que se acerquen a describir la realidad del sistema que se quiere representar ([Yapo et al., 1998](#)).

[Beven \(2000\)](#) luego de analizar distintos trabajos, concluye que la calidad en los resultados de salida de un modelo conceptual lluvia-escorrentía depende de la calidad de los datos de entrada, de la estructura del modelo y del proceso de calibración ([Sorooshian et al., 1993](#); [Lidén y Harlin, 2000](#); [Madsen, 2000](#)). Existe la calibración manual y automática, esta última es basada en algoritmos de optimización ([Dawdy y O'Donnell, 1965](#); [Chapman, 1970](#); [Nash, 1970](#); [Monro, 1971](#); [Johnston y Pilgrim, 1976](#); [Pickup, 1977](#); [Sorooshian, 1981](#); [Sorooshian et al., 1983](#); [Gupta y Sorooshian, 1985](#); [Brazil y Krajewski, 1987](#); [Hendrickson et al., 1988](#)).

La optimización según [Sorooshian et al. \(1993\)](#) y [Madsen \(2000\)](#) puede ser local o global (según el método de búsqueda). Dentro de los diferentes métodos de optimización disponibles, [Vélez \(2003\)](#) realiza una división en varios grupos:

Técnicas que cubren el espacio paramétrico; estos métodos exploran el espacio de los parámetros mediante N subconjuntos de parámetros que tratan de cubrir el espacio factible de los parámetros. Luego, la función objetivo es evaluada en los N puntos y el valor más pequeño es aproximado como el mínimo global. Estos algoritmos han demostrado ser ineficientes en el caso de modelos conceptuales ([Solomatine, 2001](#), citado por [Vélez 2003](#)).

Métodos de búsqueda aleatoria; los N puntos son seleccionados de una distribución uniforme y la función objetivo es evaluada en estos puntos. Si la función

objetivo es continua, existe garantía de la convergencia del método, pero el número de las evaluaciones de la función objetivo crece potencialmente con el número de parámetros n .

Evolución y algoritmos genéticos; el algoritmo genético, es un procedimiento de búsqueda basado en los mecanismos de selección natural, los cuales combinan una supervivencia artificial con operadores genéticos abstraídos de la naturaleza. Algunas referencias sobre este tema se pueden citar los trabajos de [Cheng, et al. \(2002\)](#), [Leon, et al. \(2004\)](#), [Di Pierro, et al. \(2005\)](#) entre otros.

Múltiple inicio y agrupamiento; la idea principal de los métodos de inicio múltiple es aplicar un procedimiento de búsqueda varias veces sobre diferentes puntos iniciales y luego realizar una valoración del óptimo global. Una versión muy utilizada consiste en el agrupamiento o “clustering” de valores cercanos, de los cuales se espera que correspondan a zonas de atracción para los siguientes puntos de inicio.

6.2.1. Procedimiento de calibración utilizado

La calibración realizada en TREX y SWMM en conjunto fue realizada en forma manual, a través de sucesivas modelaciones. Ya que en TREX, por defecto, no existe la posibilidad de realizar una calibración automática, siendo los parámetros de este modelo (principalmente coeficiente de rugosidad de Manning y parámetros de infiltración) los más sensibles en los resultados finales, ya que los resultados de este modelo son los ingresos del modelo en SWMM. Sumado a lo anterior, vale aclarar, que no era el objetivo del trabajo el acoplamiento al código fuente de TREX de una rutina que permita la calibración automática de sus parámetros. Esto también teniendo en cuenta los costos computacionales que pueden generar una calibración automática (donde se varían los parámetros de forma automática en las sucesivas modelaciones) observando el tiempo requerido para realizar las modelaciones en TREX con la resolución adoptada.

Para lo anterior, se seleccionaron cinco eventos de calibración. En éstos, se aproximaron inicialmente en TREX los parámetros de infiltración de los distintos tipos de suelos como así también su condición inicial de humedad y los parámetros de rugosidad e interceptación vegetal de cada uno de los distintos usos de suelos de la superficie de la cuenca. En SWMM se fijan inicialmente los valores de rugosidad de los cauces.

Entre estos eventos seleccionados para la calibración se logró ajustar los mismos valores de infiltración y rugosidad para todo el conjunto y un rango de déficit de humedad que dependerá para cada uno de ellos según las condiciones precedentes en la cuenca.

Los eventos de calibración fueron seleccionados de una lista inicial de siete, alguno de los cuales fueron descartados por existir dos tormentas continuas o tormentas muy extensas. Esto fue consecuencia de dos factores; en primer lugar, el modelo TREX es un modelo de evento, por lo tanto no corrige la condición inicial de humedad una vez transcurrido un evento de tormenta. De tal forma, que al simular dos tormentas continuas, al ocurrir el segundo evento lo modela sin tener en cuenta el cambio en la humedad en la cuenca debido a la ocurrencia del primer evento. Por otro lado, se suma a lo anterior, el costo computacional requerido para simular un evento de tormenta con las resoluciones

adoptadas para las subcuencas urbanas. Por ejemplo, para un evento con una duración real de ocho horas, el tiempo requerido de simulación de toda la cuenca en TREX con las resoluciones adoptadas (5 m x 5 m para subcuencas urbanas) puede llegar a siete días.

Estos cinco eventos se modelaron varias veces para poder lograr una calibración en los parámetros de infiltración y rugosidad (de llanuras y cauces) principalmente. Luego los valores de intercepción vegetal y déficit de humedad dependen de cada uno de ellos, según las condiciones antecedentes.

Sin embargo, también podrían ser variables los valores de n de Manning (rugosidad) en un rango dependiendo la época del año.

6.2.2. Eventos seleccionados

Los eventos seleccionados para la calibración, fueron cinco. Para seleccionar a los mismos, se tuvieron en cuenta las siguientes premisas:

- Eventos independientes. Es decir, eventos que luego de producirse la precipitación al llegar la avenida de caudales al punto de aforo no se inicie otro evento de tormenta. Esto es porque en TREX al definir una condición inicial de humedad, esta se mantiene constante en el tiempo.
- Eventos de corta o mediana duración. Esto es para evitar tiempos computacionales excesivos en TREX que, debido a la resolución adoptada para las cuencas urbanas (5 m x 5 m) los tiempos para las simulaciones son elevados.
- Que en el evento seleccionado existan datos confiables en las dos estaciones pluviométricas y en la estación pluviográfica seleccionadas.
- Debían quedar cinco eventos disponibles con las mismas características para realizar la validación de la calibración.

Con las premisas anteriores, se seleccionaron entonces cinco eventos para la calibración y cinco eventos para realizar la validación del modelo (Tabla 6-1 y Tabla 6-2). En éstos, se determinaron las precipitaciones medias anteriores, para poder estimar las condiciones de humedad de la cuenca previo al inicio de cada una de las tormentas. La precipitación media de los 5 días anteriores fue determinada por el método aritmético con el fin de tener una aproximación rápida del valor real y así estimar el valor inicial de déficit de humedad de la cuenca para poder calibrar los eventos.

Luego, la aplicación de las precipitaciones al modelo TREX, se describe con mayor detalle en la sección 6.2.2.1.

Los eventos seleccionados para la calibración y validación fueron los siguientes (Tabla 6-1 y Tabla 6-2).

Con respecto a los valores de precipitación media de los 5 días anteriores de cada evento se realiza un comentario sobre el evento 5. En este evento no se pudo determinar la precipitación media ya que hubo una interrupción de la medición de precipitaciones y caudales desde el día 16 de Agosto del 2013 a las 15:45 al 23 de Agosto de 2013 a las 14:30.

Tabla 6-1 - Eventos seleccionados para realizar la calibración del modelo.

Eventos para la calibración del modelo.					
Identificación	Lapso de modelación	Precipitaciones diarias en estaciones. [mm]			P media 5 días antes. [mm]
		Est. 2551010	Est. 2551034	Pluv. Cascavel	
Evento 3	08/01/2013 a las 06:00 hasta el 09/01/2013 a las 15:00	34,28	10,99	73,54	54,57
Evento 5	26/08/2013 a las 1:30 al 26/08/2013 a las 22:30	33,31	34,79	47,34	-
Evento 6	06/01/2013 a las 14:45 al 07/01/2013 a las 16:00	21,16	45,63	40,93	22,35
Evento 8	12/12/2012 a las 14:45 al 12/12/2012 a las 23:00	19,67	29,44	54,68	2,10
Evento 9	17/07/2011 a las 20:00 al 18/07/2011 a las 8:45	22,00	5,10	48,80	0,00

Tabla 6-2 - Eventos seleccionados para realizar la validación del modelo.

Eventos para la validación del modelo.					
Identificación	Lapso de modelación	Precipitaciones diarias en estaciones. [mm]			P media 5 días antes. [mm]
		Est. 2551010	Est. 2551034	Pluv. Cascavel	
Evento 10	21/07/2011 a las 3:15 al 22/07/2011 a las 7:30	31,82	22,63	68,8	33,28
Evento 11	30/12/2012 a las 14:30 al 31/12/2012 a las 12:15	34,49	2,1	62,24	48,19
Evento 12	15/11/2012 a las 14:15 al 16/11/2012 a las 03:15	23,92	27,42	21,45	15,76
Evento 13	02/11/2012 a las 22:15 al 03/11/2012 a las 7:30	10,03	19,57	23,08	19,22
Evento 14	21/09/2012 a las 00:15 al 21/09/2012 a las 11:00	29,42	0,0	34,23	31,55

6.2.2.1. Aplicación de los datos de precipitación al modelo TREX

Para aplicar los datos de precipitación disponible al modelo TREX se realizó la transformación de las estaciones pluviométricas para ingresar dichos datos en TREX como si fueran tres estaciones pluviográficas.

Para lo anterior, recordando que los datos disponibles son dos estaciones pluviométricas (datos diarios) y una estación pluviográfica (datos cada 15 minutos), se utilizaron los datos de la estación pluviográfica para distribuir temporalmente los datos diarios de las estaciones pluviométricas. De esta forma, se obtiene una distribución temporal que es proporcional con respecto a la precipitación diaria en las tres estaciones.

Aquí un ejemplo de obtención de la precipitación en una de las estaciones pluviométricas para un intervalo de tiempo (Tabla 6-3).

Tabla 6-3 - Ejemplo de cálculo de las precipitaciones en las estaciones pluviométricas para los distintos intervalos de tiempo.

	Estación Pluviográfica Cascavel	Est. Pluviométrica 2551010	Estación Pluviométrica 2551034
Precipitación diaria [mm]	48,80	22,00	5,10
Precipitación el 17/07/2011 11:00 a 11:15 p.m. (15 minutos) [mm]	4,60	2,07	0,48

En TREX se realiza la distribución de precipitaciones según la ubicación de las estaciones por el método de interpolación de la distancia inversa ponderada (IDW en sus siglas en inglés).

La ecuación utilizada por TREX para realizar la interpolación se presenta a continuación:

$$i^t(j, k) = \frac{\sum_{m=1}^{NRG} \frac{i_m^t(jrg, krg)}{d_m^b}}{\sum_{m=1}^{NRG} \frac{1}{d_m^b}} \quad (6-1)$$

Dónde:

$i^t(j, k)$ = intensidad de precipitación en el elemento (j,k) en el tiempo t.

$i_m^t(jrg, krg)$ = intensidad de precipitación medida en el pluviógrafo de coordenadas (jrg,krg) en el tiempo t.

d_m = distancia desde el punto de muestra y el desconocido.

b = exponente de interpolación. En la modelación utilizado el exponente igual a 2.

NRG = Número total de pluviógrafos.

A continuación, en la Tabla 6-4 se presentan las precipitaciones medias caídas en la Cuenca del Río Cascavel en cada uno de los eventos determinadas con el mismo método utilizado en TREX.

Luego, en la Figura 6-1 un ejemplo de intensidades de precipitaciones caídas en la cuenca del Río Cascavel según la metodología planteada anteriormente para el evento 3 en los tiempos 0,75 horas y 2 horas de la simulación, en donde con rombos rojos se representan cada una de las estaciones.

Tabla 6-4 - Precipitaciones media caída en la Cuenca del Río Cascavel en cada evento.

	Precipitación Media [mm]
Evento 3	47,86
Evento 5	36,85
Evento 6	43,61
Evento 8	32,40
Evento 9	26,68
Evento 10	41,29
Evento 11	36,10
Evento 12	23,97
Evento 13	13,99
Evento 14	21,50

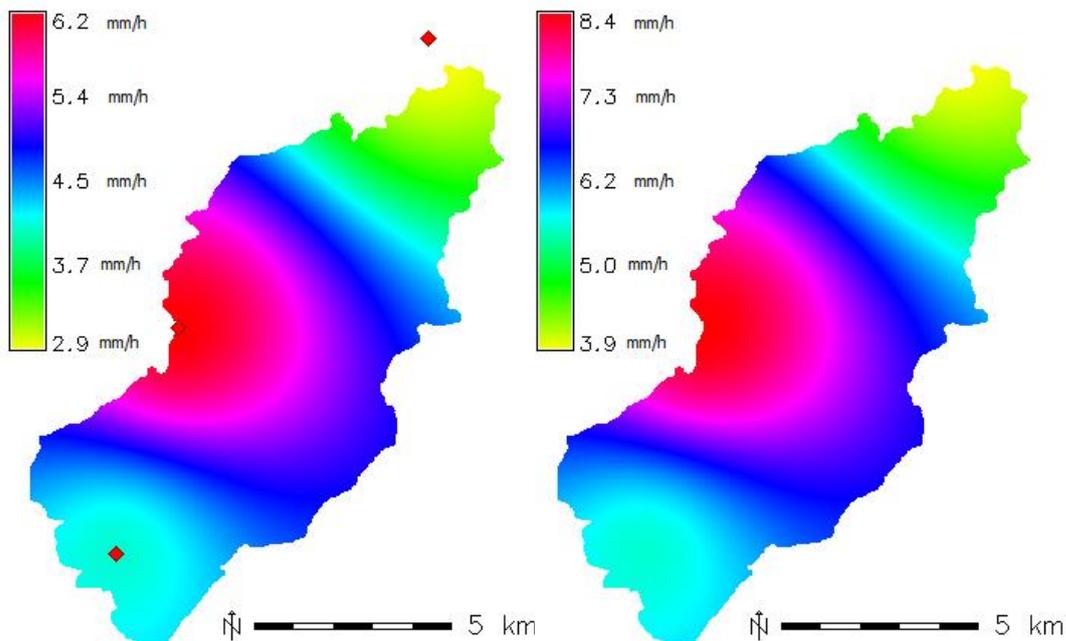


Figura 6-1 - Distribución espacial de intensidad de precipitaciones para el evento 3 a las 0,75 horas de simulación (izquierda) y a las 2,0 horas de simulación (derecha).

Como se observan en las figuras anteriores (Figura 6-1), los mapas tienen distintos valores máximos y mínimos de intensidad de precipitación [mm/h], pero tienen una igual distribución de los colores lo que indica que la distribución espacial de precipitaciones es proporcionalmente similar en todo el día del evento.

Esta simplificación que se realizó, puede traer consecuencias en la respuesta de la cuenca, ya que se ha demostrado que la distribución temporal y espacial de la tormenta tiene influencia en la respuesta de la cuenca ([Weber et al, 2012](#)). Sin embargo, en este trabajo no estamos captando la variación temporal de dos estaciones pluviométricas por lo tanto puede ocurrir que en esas ocasiones precipite antes o después que la estación pluviográfica o con distinta intensidad, que conlleva a distintas respuesta hidrológica en la cuenca.

6.2.2.2. *Procesamiento de los datos de caudal medido*

Para la comparación entre los caudales observados y simulados por el modelo TREX-SWMM en primer lugar, se realizó un procesamiento de los datos de caudal medido para poder extraer los escurrimientos superficiales de cada evento. Esto es debido, que en TREX solo se simulan los flujos superficiales.

Para realizar la extracción se utilizó el método de Barnes ([Orsolini et al., 2000](#)). Según este método se parte que en coordenadas semilogarítmicas las curvas del descenso de cada componente estarán aproximadamente representadas por rectas de pendientes diferentes (Figura 6-2).

El método consiste en prolongar hacia la izquierda la parte terminal casi rectilínea del hidrograma global, hasta la altura del caudal pico, obteniendo una recta que representará el descenso del escurrimiento subterráneo. Las ordenadas que quedan por encima de estas rectas representan la suma de los hidrogramas relativos al escurrimiento subsuperficial y al escurrimiento superficial. Con una construcción idéntica a la adoptada para las aguas superficiales se puede representar el escurrimiento subsuperficial.

Por otro lado, se tomó el caudal base inicial de cada evento para utilizar en SWMM y “precalentar” el modelo. Este caudal base se tomó como constante en el precalentamiento de SWMM para simplificar el ingreso al modelo. Se distribuyó este caudal en relación al largo de los conductos de forma tal que al momento de iniciar la precipitación del evento a modelar el caudal a la salida de la cuenca (en la estación de medición de caudal) sea igual al caudal medido. Esto se realizó para evitar que al llegar los escurrimientos superficiales o de la red de drenaje a los cauces, provocados por los eventos a modelar, se generen diferencia de velocidades en los mismos debido a que no existiera, sin este precalentamiento previo del modelo, escurrimiento en los cauces naturales.

Dicho proceso, se realizó para cada uno de los eventos seleccionados para así poder comparar los escurrimientos superficiales por los simulados por TREX-SWMM.

A continuación, a modo de ejemplo la extracción de los caudales subterráneos en uno de los eventos (Figura 6-3, Figura 6-4 y Figura 6-5).

En la Figura 6-3 se observa el gráfico de la distribución temporal de la precipitación media en la cuenca y la del pluviógrafo que se utiliza para justamente aproximar la distribución temporal de las precipitaciones en las otras dos estaciones pluviométricas utilizada para las modelaciones. Lo anterior, fue explicado en la sección 6.2.2.1. La Figura 6-3 se graficó de esta forma, para observar, como consecuencia del procedimiento aplicado, como la precipitación media tiene la misma distribución temporal que el pluviógrafo.

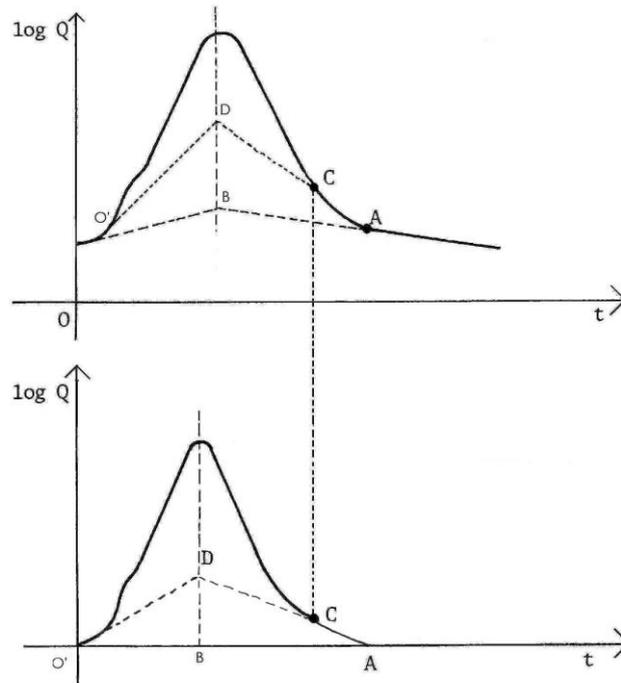


Figura 6-2 - Método de Barnes (Orsolini et al., 2000).

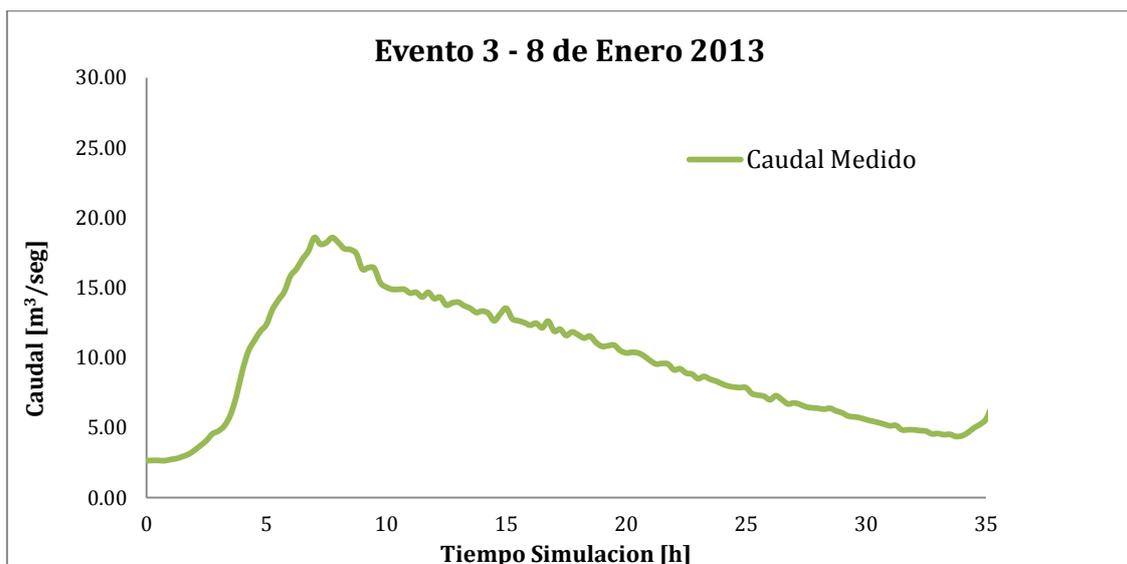


Figura 6-3 - Caudales medidos en estación Cascavel - Evento 3.

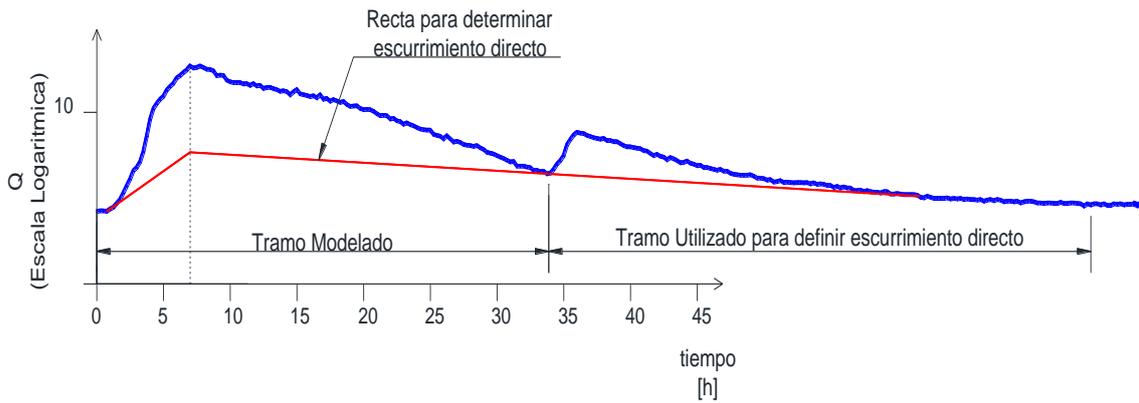


Figura 6-4 - Extracción e caudal base por método de Barnes para el Evento 3.

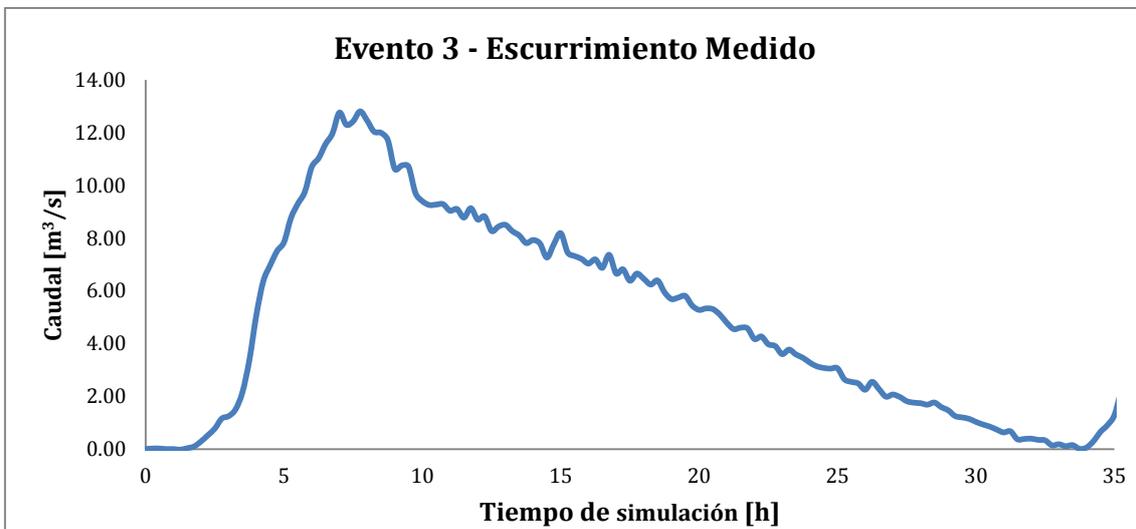


Figura 6-5 - Ecurrimiento superficial medido en el Evento 3 luego del procesamiento por método de Barnes.

6.2.3. Estadísticos para evaluar el ajuste de calibración

Para evaluar el grado de ajuste logrado en el proceso de calibración, se utilizaron el coeficiente de determinación R^2 , el coeficiente de eficiencia de Nash-Sutcliffe NSE, el sesgo porcentual PBIAS, y la media $\mu (|\epsilon|)$ y desvío estándar $\sigma(|\epsilon|)$ de los valores absolutos de los residuos:

- Coeficiente R^2 :

$$R^2 = \frac{\sigma(F_i, F_i^c)}{\sigma(F_i) \cdot \sigma(F_i^c)}$$

Donde F_i representa los valores de caudal observados y F_i^c representa los valores de caudal calculados con el conjunto de modelos TREX-SWMM con los parámetros ajustados, $\sigma(F_i) \cdot \sigma(F_i^c)$ es la covarianza entre los caudales medidos y los calculados, y σ es el desvío estándar. El valor de R^2 tiende a 1 cuando los puntos se acercan a la línea de regresión y se acercan a una línea recta.

- NSE:

$$NSE = 1 - \frac{\sum(F_i - F_i^c)^2}{\sum(F_i - \bar{F})^2}$$

Los valores F_i y F_i^c también representan como se mencionó anteriormente los valores de caudal observados y simulados respectivamente. \bar{F} representa el promedio del caudal observado sobre el período de datos.

Es una forma de normalizar la función objetivo de mínimos cuadrados. Determina la magnitud relativa de la varianza residual en comparación con la variación de datos medidos, un ajuste perfecto de este criterio viene dado por la unidad, un ajuste negativo indica que un modelo es “pobre” y no se ajusta a los datos observados. Mientras más cercano a uno sea este criterio estadístico mejor será la bondad de ajuste.

- Sesgo porcentual PBIAS:

$$PBIAS = \frac{\sum(F_i - F_i^c)}{\sum(F_i)} \cdot 100$$

Es una medida que indica la tendencia promedio de los datos simulados a ser mayores o menores que los datos observados, es decir para reflejar la sistemática del modelo para la sub o sobre-producción de caudales ([Gupta et al., 1999](#)), un valor de 0 indica un ajuste perfecto.

- Media de los valores absolutos de los desvíos de la predicción:

$$\mu(|\varepsilon|) = \frac{\sum|F_i - F_i^c|}{N}$$

- Desvío estándar de las predicciones:

$$\sigma(|\varepsilon|) = \sqrt{\frac{\sum|F_i - F_i^c|^2}{N}}$$

6.2.4. Estimación de parámetros de ajuste

Para la estimación de los parámetros iniciales de infiltración y rugosidad se utilizaron los datos provenientes de tipo y uso de suelo correspondiente a los caracterizados anteriormente (Secciones 3.4 y 3.6).

6.2.4.1. Parámetros de Infiltración

Se estimaron los parámetros del modelo Green y Ampt utilizado por TREX para simular la infiltración de la cuenca.

Esta estimación se realizó utilizando la proporción de arena, limo y arcilla que compone cada tipo de suelo, extrapolando en los triángulos de textura de USDA los valores recomendados por [Rawls et al \(1982\)](#). Luego estos valores fueron calibrados (Tabla 6-5).

MODELACIÓN HIDROLÓGICA-HIDRÁULICA TOTALMENTE DISTRIBUIDA DE UNA CUENCA FUERTEMENTE ANTROPIZADA – CASO DEL RÍO CASCAVEL (GUARAPUAVA/PR, BRASIL)

Tabla 6-5 - Valores calibrados de los parámetros de infiltración del modelo TREX.

Tipo de Suelo	K_h [m/s]	Altura de Succión [m]	Porosidad efectiva
Construcciones Impermeable	12,0000E-25	0,1903	0,01
Calles. Impermeable	12,0000E-25	0,1903	0,01
Lattosolo	8,33333E-8	0,3163	0,385
Nittosolos Brunos	1,17777E-7	0,3163	0,385
Nittosolos Litólicos	1,17777E-7	0,3163	0,385
Cauces Permeable	12,0000E-0	0,1903	1,00

6.2.4.2. Rugosidad e intercepción vegetal

La rugosidad de la cuenca fue estimada para cada unidad de vegetación según las descripciones para cada uso de suelo, teniendo en cuenta mayoritariamente la cobertura vegetal y tipo de vegetación. Luego, estos valores fueron calibrados.

En la Tabla 6-6 se encuentran los valores de la rugosidad (n de Manning) que resultaron del ajuste de los hidrogramas superficiales simulados con respecto a los medidos.

Tabla 6-6 - Valores calibrados para la rugosidad superficial en el modelo TREX.

Uso de Suelo	N de Manning
Vegetación Arbórea	0,300
Vegetación Rastrera	0,080
Suelo expuesto	0,013
Áreas húmedas	0,013
Construido	0,013

Cada uso de suelo se describió en la sección 5.1.4. Por otro lado, los valores de n de Manning se ajustaron teniendo en cuenta distinta bibliografía que sugieren valores de n de Manning para el flujo superficial (overland flow) ([Du, et al. 2007](#); [Cronshey, 1986](#); [Kalyanapu, et al. 2010](#); [Barros, 2012](#)). A su vez, dichos trabajos citan principalmente dos trabajos: [Engman \(1986\)](#) y [McCuen \(1989\)](#).

A continuación, se presentan en la Tabla 6-7 el rango de valores de rugosidad para flujo superficial que se encuentran en dichos trabajos tomados como referencia.

Tabla 6-7 – Rango de coeficientes de rugosidad de Manning para flujo superficial recopilados de los trabajos de Du, et al. (2008), Cronshey, (1986), Kalyanapu, et al. (2010) y Barros (2012).

Uso de Suelo	N de Manning
Asfalto liso	0,011 – 0,012
Hormigón liso	0,011 – 0,013
Suelo desnudo	0,011
Barbecho	0,050
Suelo cultivado con residuos de cobertura ≤ 20 %	0,060
Suelo cultivado con residuos de cobertura > 20 %	0,170
Pasturas (Grass) – pradera con pastura corta	0,150
Pasturas (Grass) – pastos densos	0,240
Pasturas (Grass) – bermuda grass.	0,410
Bosques – con maleza ligera.	0,400
Bosques – con maleza densa.	0,800

Por otro lado, en la siguiente tabla (Tabla 6-8) se presenta el rango de valores utilizados del parámetro de intercepción vegetal para distintos tipos de suelo dentro de la cuenca. Los mismos dependen evento a evento dependiendo si existieron o no eventos de precipitación en los días anteriores:

Tabla 6-8 – Rango de valores de intercepción utilizados en los distintos eventos.

Uso de Suelo	Intercepción vegetal. [mm]
Vegetación arbórea.	0 - 5
Vegetación rastrera.	0 - 3
Suelo Expuesto.	0 - 0,5
Áreas húmedas.	0 - 0,5
Construido.	0 - 1

6.2.4.3. Déficit de humedad de la cuenca

El déficit de humedad de cada tipo de suelo es otro parámetro del modelo TREX. Estos valores, aunque deben ser ajustados en la calibración, dependen de cada uno de los eventos y su condición antecedente de humedad y de precipitaciones. Por lo tanto, existe un valor de déficit de humedad que se ajustó para cada uno de los eventos.

Recordando, el déficit de humedad se encuentra representado por:

$$\Delta M = (1 - S)\theta_e$$

Dónde:

S = porcentaje de saturación del suelo.

θ_e = porosidad efectiva del suelo.

Los valores de déficit de humedad ajustados para cada evento de calibración se presentan a continuación, en la Tabla 6-9.

MODELACIÓN HIDROLÓGICA-HIDRÁULICA TOTALMENTE DISTRIBUIDA DE UNA CUENCA FUERTEMENTE ANTROPIZADA – CASO DEL RÍO CASCAVEL (GUARAPUAVA/PR, BRASIL)

Tabla 6-9 - Déficit de humedad de la cuenca ajustado para cada evento utilizado para la calibración.

Evento	Fecha	Déficit de Humedad [adimensional]
Evento 3	08/01/2013	0,050
Evento 5	26/08/2013	0,035
Evento 6	06/01/2013	0,070
Evento 8	12/12/2012	0,300
Evento 9	17/07/2011	0,090

6.2.4.4. Forma y rugosidad de cauces y canales

Para determinar la forma y rugosidad de los cauces se utilizó el relevamiento realizado en el trabajo de [Gomes \(2014\)](#) y observaciones a través de Google Earth. Se compararon las imágenes con la bibliografía para obtener el valor de n Manning en los cauces ([Chow et al, 1994](#)).

[Gomes \(2014\)](#) realizó el relevamiento de diversas secciones en las cuencas urbanas de Arroio Barro Preto, Carro Quebrado y Engenho (Figura 6-8).

6.2.4.5. Sección de conductos

Para determinar la sección de los conductos de la red cerrada que simulan la red de drenaje pluvial de la localidad de Guarapuava, se aproximó con un diámetro tal que no existan conductos con capacidad llena en ninguno de los eventos. De esta forma, se inició con conductos circulares de diámetro 600 mm (debido a la observación en el lugar del Dr. Leandro Vestena y su equipo de UNICENTRO) y luego debido a las observaciones en las distintas modelaciones se agrandaron los diámetros de aquellos conductos en donde su capacidad se veía sobrepasada. Esto hizo que en algunos sectores existan conductos circulares de 800 mm de diámetro y de 1000 mm de diámetro.

Lo anterior fue debido a que no existen datos precisos (no existe planimetría de la traza ni sección de los conductos) sobre la ubicación ni tamaño de los conductos de la red de drenaje, solamente existe la observación y relevamiento de algunos conductos realizados por el Dr. Leandro Vestena y su equipo de UNICENTRO.

Se adoptó una sección circular debido al relevamiento visual mencionado anteriormente y al realizado en Street View donde se puede observar en algunos sectores las descargas de dichos conductos.

Para verificar que no existan conductos a presión se verificó modelación a modelación que no existan conductos con capacidad completa.

Sumado a esto, se realizó la modelación de cada evento con una red uniforme de caños circulares de 800 mm de diámetro y con una red uniforme de caños circulares de 1000 mm de diámetro (salvo aquellos conductos en que se veían excedida su capacidad). Se observó que no existieron significativas diferencias en el caudal de salida de la cuenca con la red adoptada de conductos circulares de 600 mm de diámetro.

En los siguientes gráficos (Figura 6-6 y Figura 6-6) se puede observar la correlación existente entre los caudales simulados para el Evento 8 con una red de

conductos circulares de 800 mm de diámetro y 1000 mm de diámetro con respecto a los caudales simulados para el mismo evento con la red de drenaje pluvial adoptada (de cañería de 600 mm de diámetro que fue agrandándose según la capacidad necesaria).

Se observa incluso que la ecuación de la línea de tendencia tiene una pendiente muy cercana al valor 1.

Por otro lado, se utilizó el trabajo de [Gomes \(2014\)](#) para determinar aquellos sectores donde los cauces se encuentran canalizados y que sección tienen.

Luego se presentan (Figura 6-9, Figura 6-10, Figura 6-11, Figura 6-12, Figura 6-13 y Figura 6-14) los mapas que se elaboraron en dicho trabajo y a la vez la representación de los cauces canalizados en SWMM.

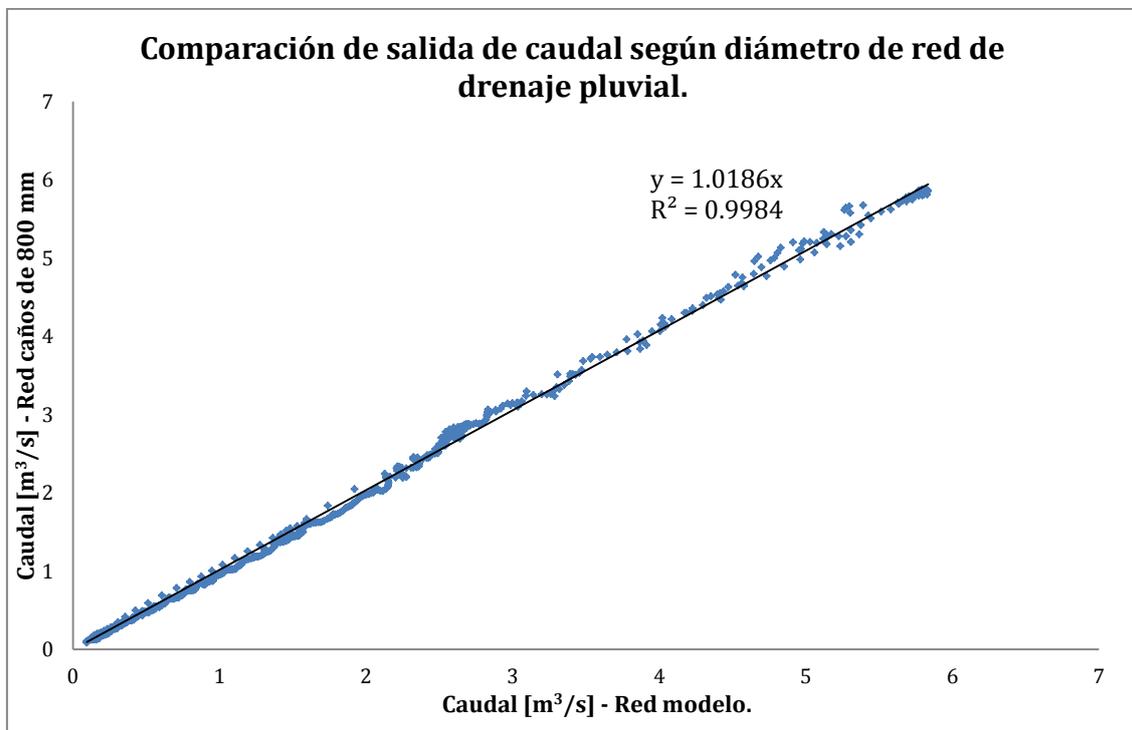


Figura 6-6 - Comparación de caudales simulados para el Evento 8 con una red de drenaje de sección circular de 800 mm con respecto a los caudales simulados con la red de drenaje adoptada.

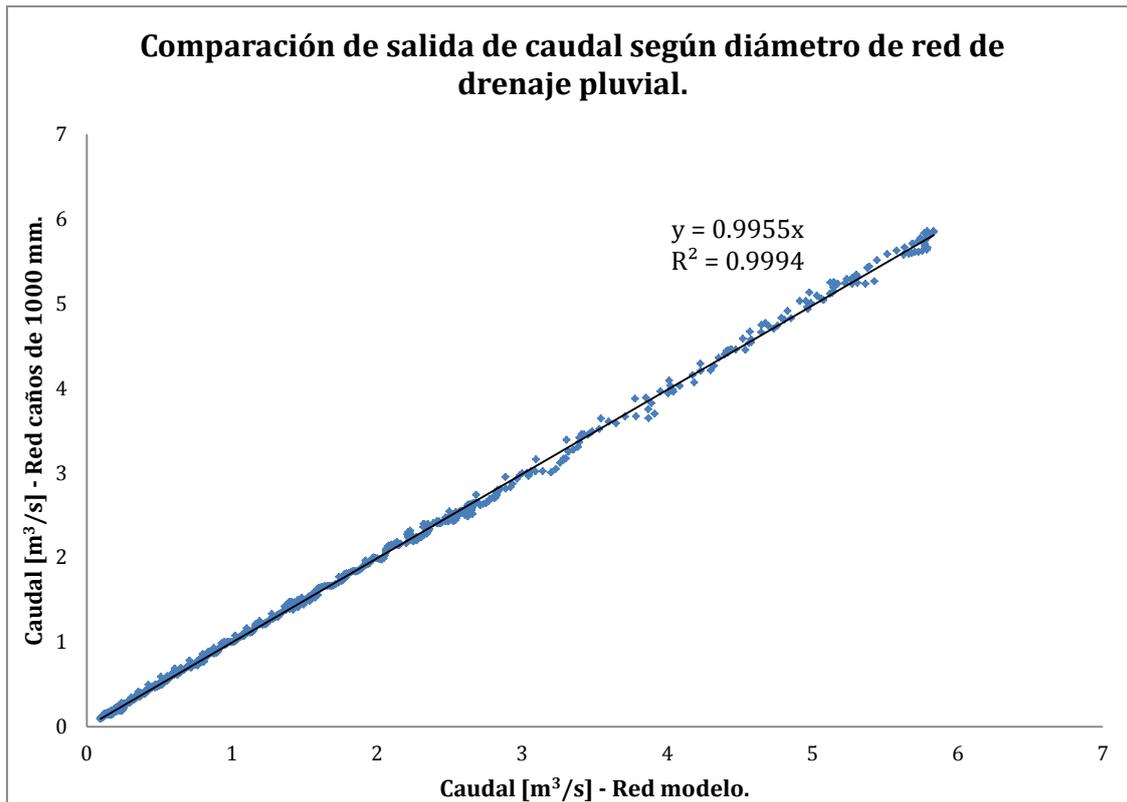


Figura 6-7 - Comparación de caudales simulados para el Evento 8 con una red de drenaje de sección circular de 1000 mm con respecto a los caudales simulados con la red de drenaje adoptada.



Figura 6-8 - Vista de cauce modificado por el hombre dentro de la localidad de Guarapuava.

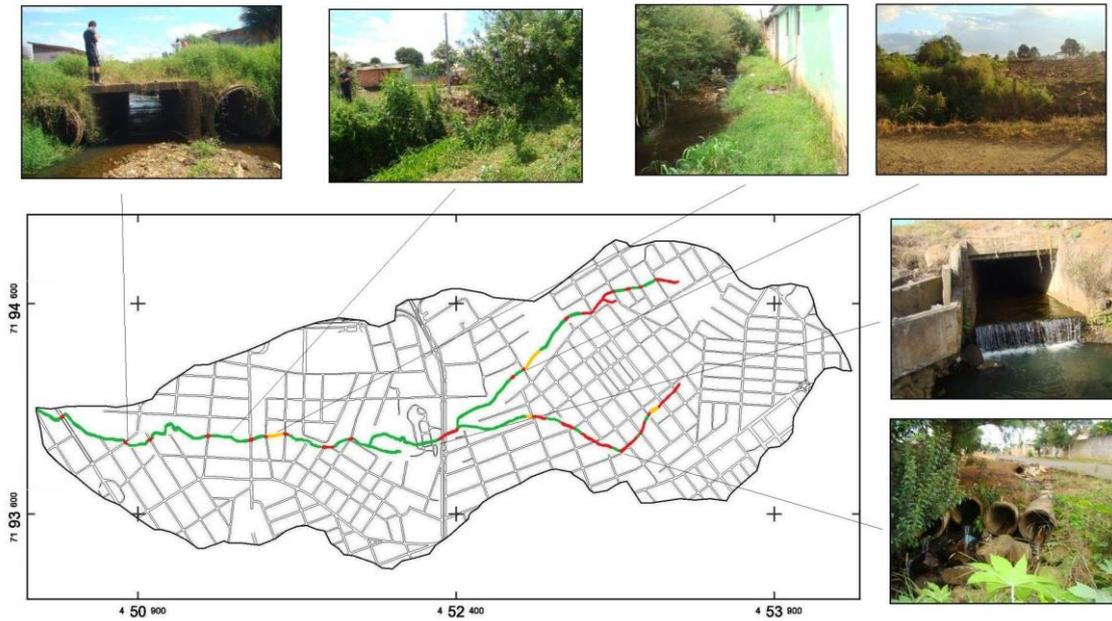


Figura 6-9 - Mapa elaborado por [Oliveira \(2011\)](#) de las modificaciones de los cauces en la Subcuenca Barro Preto. En verde sector no modificado, en rojo cauce canalizado y en amarillo cauce parcialmente modificado.

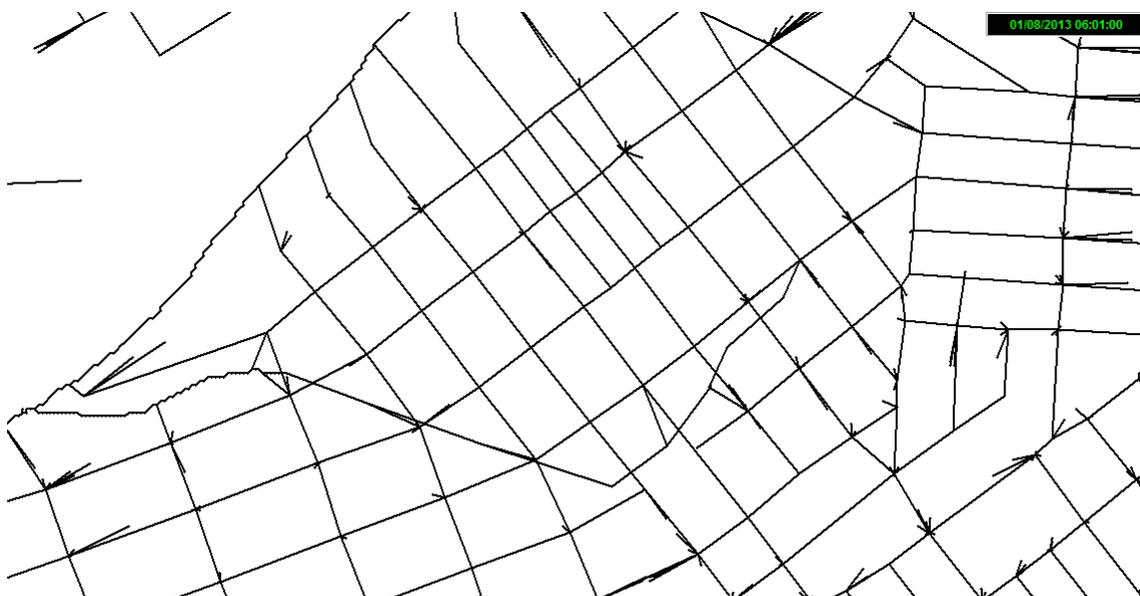


Figura 6-10 - Sector de la subcuenca Barro Preto en SWMM donde se observan los conductos canalizados.

MODELACIÓN HIDROLÓGICA-HIDRÁULICA TOTALMENTE DISTRIBUIDA DE UNA CUENCA FUERTEMENTE ANTROPIZADA – CASO DEL RÍO CASCAVEL (GUARAPUAVA/PR, BRASIL)

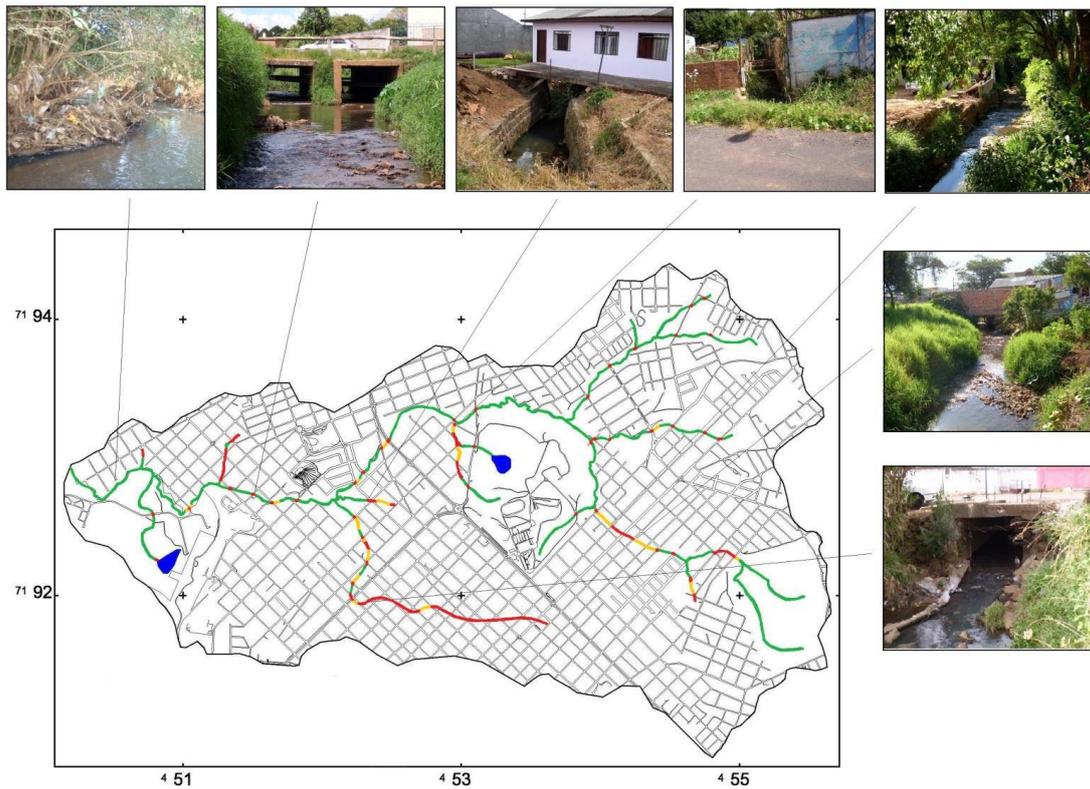


Figura 6-11 - Mapa elaborado por [Oliveira \(2011\)](#) de las modificaciones de los cauces en la Subcuenca Carro Quebrado. En verde sector no modificado, en rojo cauce canalizado y en amarillo cauce parcialmente modificado.

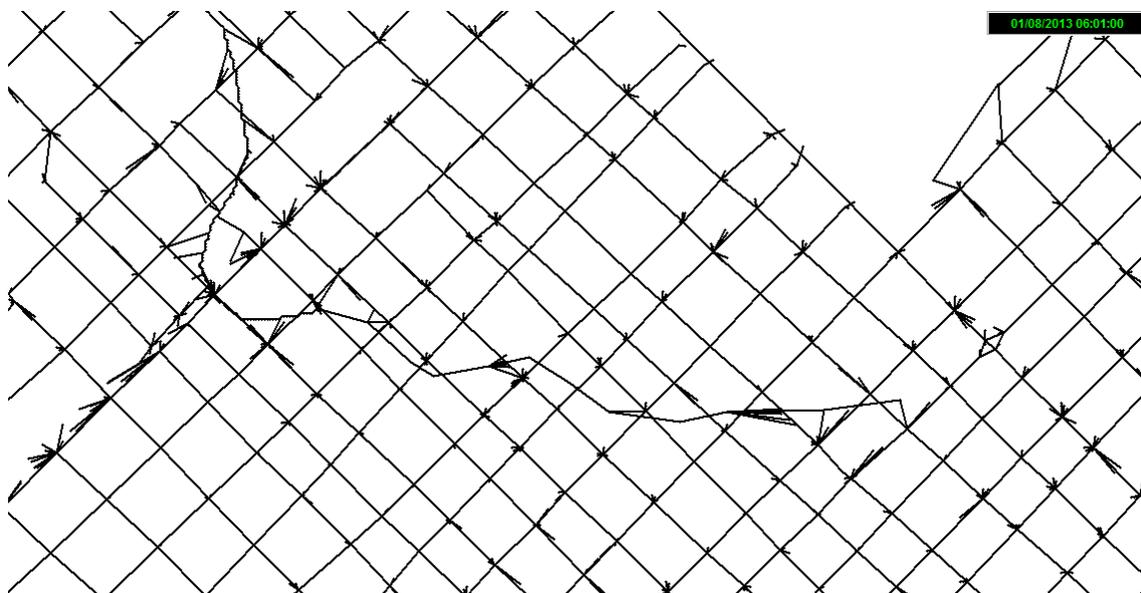


Figura 6-12 - Sector de la subcuenca Carro Quebrado en SWMM donde se observan los conductos canalizados.

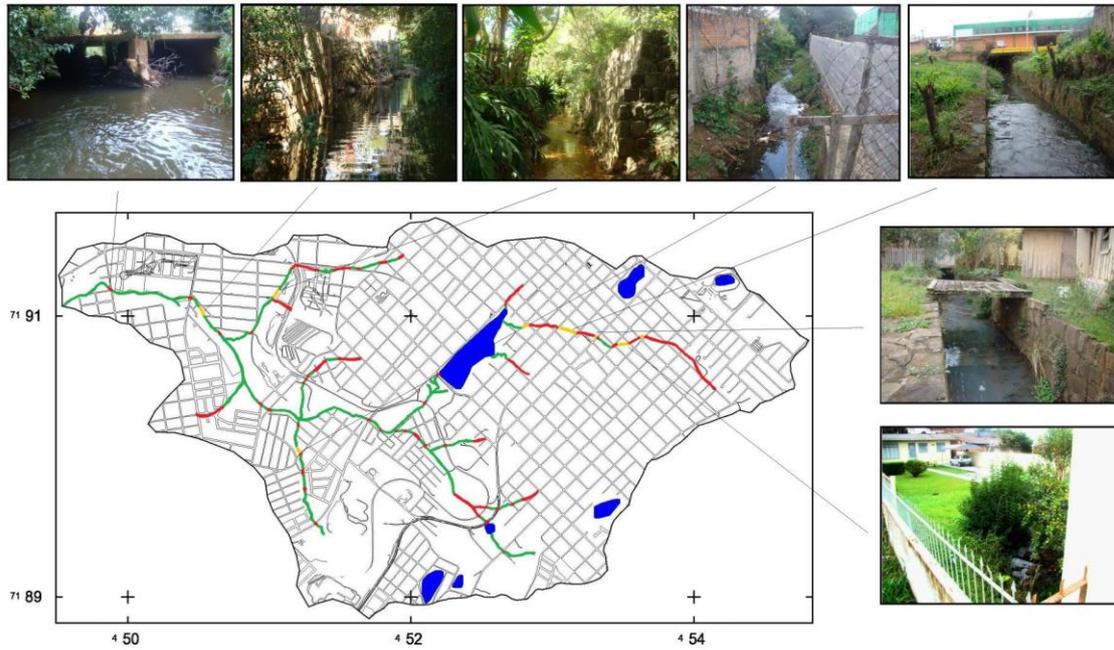


Figura 6-13 - Mapa elaborado por [Oliveira \(2011\)](#) de las modificaciones de los cauces en la Subcuenca Arroyo Engenho. En verde sector no modificado, en rojo cauce canalizado y en amarillo cauce parcialmente modificado.

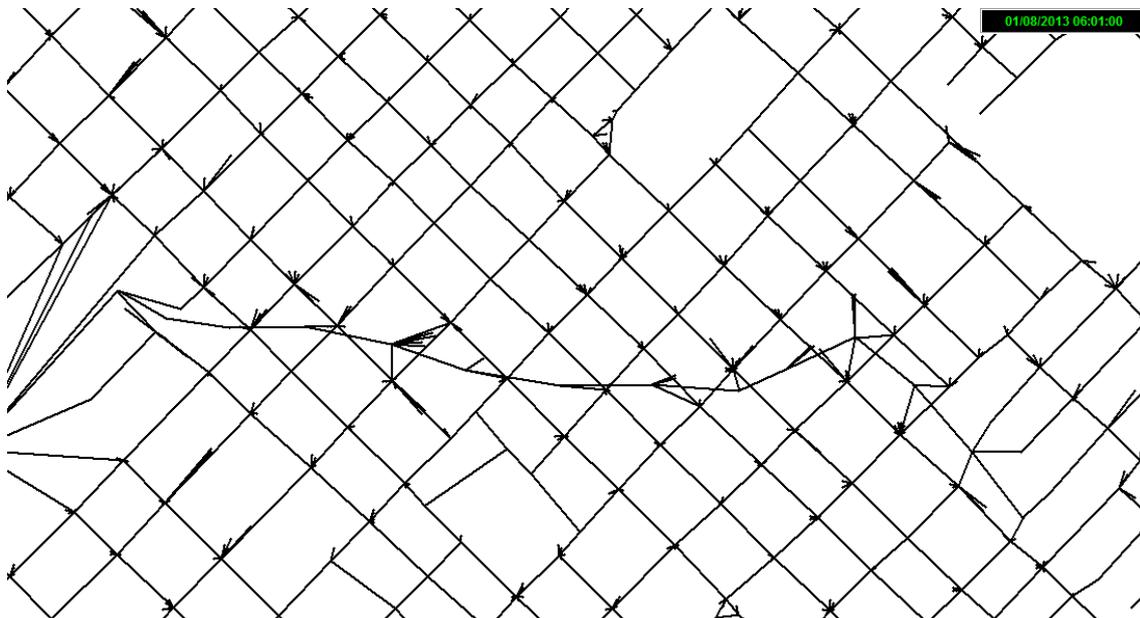


Figura 6-14 - Sector de la subcuenca Engenho en SWMM donde se observan los conductos canalizados.

6.3. Resultados de la calibración del modelo

A continuación, se presenta una tabla resumen con los valores estadísticos resultado del proceso de calibración de los eventos. A su vez, se presentan gráficos donde es posible observar el grado de ajuste de un evento en particular. Los resultados en TREX - SWMM, como fue mencionado anteriormente, se pueden obtener en distintos formatos (hidrogramas, mapas de salida, archivos resumen, etc.), en este caso se presentan los hidrogramas, comparando los caudales superficiales simulados con los valores medidos. Al mismo tiempo se obtuvieron los mapas de infiltración (velocidad y altura acumulada), precipitación (intensidad y altura acumulada) y altura de descarga. Estos mapas fueron utilizados para verificar el correcto funcionamiento del modelo y encontrar posibles errores, como ser: errores en las coordenadas de las estaciones pluviométricas (se ve reflejado en los mapas en estaciones mal ubicadas), errores en los tiempos e intensidades de las precipitaciones, errores con los cauces de los ríos, etc.

Cabe aclarar que los hidrogramas graficados a continuación fueron obtenidos de SWMM del conducto que simula el cauce en el sector donde se midieron los caudales en la cuenca del Río Cascavel (ver sección 5.1.2).

Por otro lado, no se realizó la comparación de niveles simulados y medidos ya que en SWMM se utilizó una sección transversal simplificada de los cauces.

Los valores medidos del caudal líquido en la estación Cascavel se encuentran con un intervalo de 15 minutos, en cambio, aunque la simulación en TREX es continua, los resultados se imprimen cada 6 minutos (0,1 hora) según el requerimiento del usuario. Es por ello, en que se diferencian dos hidrogramas; uno de puntos discretos (valores medidos) y otro de valores continuos (valores simulados).

En la calibración, las variables más sensibles que fueron modificándose modelación a modelación para encontrar un adecuado ajuste fueron la rugosidad (n de Manning), la infiltración y el estado de humedad inicial. Con menor sensibilidad pero también hubo que realizar varios ajustes con la rugosidad de los conductos y cauces naturales.

Se observa en general una aceptable correlación entre los caudales simulados con los observados. Dicha correlación se aprecia observando también los resultados del coeficiente R^2 . Sin embargo, hay eventos como ser el Evento 3 y Evento 6 donde los valores de NSE y PBIAS se alejan del valor ideal (valor 1 y 0 %) para dichos coeficientes (Tabla 6-10).

Si se observa gráficamente (Figura 6-15, Figura 6-16, Figura 6-17, Figura 6-18 y Figura 6-19) los resultados de estos eventos mencionados se puede inferir algunas de las posibles causas. En el Evento 3, por ejemplo en la simulación no es posible captar el efecto que se observa en el hidrograma de salida medido que contiene una rama descendiente suave.

En el evento 6, no es posible captar un pico inicial de crecida que se da anteriormente al pico principal.

Estos errores pueden darse por diversos motivos. En estos casos y analizando los hidrogramas simulados, uno de los motivos puede atribuirse a la incertidumbre de la distribución temporal de las precipitaciones ya que, como se mencionó anteriormente se adoptó una distribución temporal de las precipitaciones de los pluviómetros proporcional a la distribución diaria de precipitaciones del pluviógrafo. Esto, dependiendo el tipo de tormenta puede tener un cierto grado de error, más todavía en cuencas de un tamaño considerable. Lo anterior, se pudo demostrar en trabajos anteriores como el de los efectos en la respuesta de una cuenca ante el movimiento de una tormenta ([Weber et al., 2012](#)).

Tabla 6-10 - Valores estadísticos obtenidos en el proceso de calibración.

Evento	Fecha	R²	NSE	PBIAS [%]	Media	Desviación estándar	Déficit de Humedad
Evento 3	08/01/2013	0,545	-0,649	48,26	3,22	1,796	0,050
Evento 5	26/08/2013	0,949	0,874	0,19	0,516	0,719	0,035
Evento 6	06/01/2013	0,872	0,842	9,19	0,207	0,455	0,070
Evento 8	12/12/2012	0,945	0,905	4,49	0,072	0,268	0,300
Evento 9	17/07/2011	0,840	0,832	-0,83	0,010	0,102	0,090

Puede existir también una incertidumbre en la calibración de los valores de rugosidad de las cuencas rurales, ya que al analizar imágenes satelitales de diversos años y épocas dentro de un mismo año, se observan que dicho sector puede cambiar su uso de suelo dependiendo del ciclo agronómico-forestal de siembra, cosecha o especie de siembra. Aunque el sector rural que se ubica aguas arriba del sector urbanizado genera un escurrimiento menor a este último, lo mencionado anteriormente sobre la rugosidad adoptada al área rural tiene influencia en la conformación del pico de crecida final simulado.

Sin embargo, se puede considerar como aceptable el grado de ajuste obtenido en los eventos seleccionados y para los pares de datos utilizados para la calibración, más aun teniendo en cuenta los grados de incertidumbre por ejemplo en las precipitaciones y en la red de drenaje.

Se analizó también la diferencia porcentual entre el volumen escurrido calculado y el volumen escurrido medido, como así también los caudales picos medidos y simulados. En la Tabla 6-11 se presenta lo anterior y se puede observar lo que se mencionó anteriormente respecto al evento 3 que no se pudo simular adecuadamente la rama descendente del hidrograma, por lo tanto el volumen escurrido simulado es considerablemente menor al volumen escurrido medido. Teniendo en cuenta también para dicho evento que el caudal pico simulado es levemente superior al medido, se podría inferir que hay algún error en las precipitaciones o en las distribuciones temporal y espacial de las mismas. Adicionalmente, en la

Tabla 6-12 se agregaron el tiempo de ocurrencia de los caudales picos de los hidrogramas medidos y simulados (tiempo desde el inicio de la precipitación de cada evento). En dicha tabla se puede observar que en general los caudales picos de los

MODELACIÓN HIDROLÓGICA-HIDRÁULICA TOTALMENTE DISTRIBUIDA DE UNA CUENCA FUERTEMENTE ANTROPIZADA – CASO DEL RÍO CASCAVEL (GUARAPUAVA/PR, BRASIL)

hidrogramas simulados ocurren en coincidencia o casi en coincidencia con los caudales picos medidos, exceptuando el evento 3 en donde en la simulación el caudal pico se adelanta 2.2 horas con respecto al caudal medido. Esta diferencia en el tiempo del caudal pico sumada a la diferencia del volumen escurrido entre lo simulado y medido en el evento 3, nos permite inferir que puede que exista una diferencia en la precipitación caída, principalmente en su distribución temporal. Esto último teniendo en cuenta que se tiene información de la distribución temporal de las lluvias de una sola de las tres estaciones, en la que existe el pluviógrafo, y luego para las dos estaciones pluviométricas se adoptó dicha distribución temporal.

Tabla 6-11 - Análisis de diferencias entre volumen escurridos y caudales picos medidos y simulados para los eventos de calibración.

	Volumen Escurrido			Caudal Pico		
	Medido [m ³]	Simulado [m ³]	Diferencia [%]	Medido [m ³ /s]	Simulado [m ³ /s]	Diferencia [%]
Evento 3	559457.65	289472.41	-48%	12.8	13.89	9%
Evento 5	170679.97	144601.87	-15%	5.34	6.081	14%
Evento 6	188460.82	171143.33	-9%	6.4	6.95	9%
Evento 8	93275.14	89543.03	-4%	6.49	5.63	-13%
Evento 9	70888.50	71474.18	1%	3.53	4.77	35%

Tabla 6-12 - Tiempo de ocurrencia de caudal pico de crecida en hidrograma medido y simulado para los eventos de calibración.

	Tiempo de ocurrencia de pico.		
	Medido [horas]	Simulado [horas]	Diferencia [horas]
Evento 3	7.70	5.50	-2.20
Evento 5	12.00	12.00	0.00
Evento 6	5.00	5.00	0.00
Evento 8	2.75	2.50	-0.25
Evento 9	5.25	5.00	-0.25

También se presentan los gráficos de correlación para cada uno de los eventos calibrados (Figura 6-20). En particular, en el gráfico correspondiente al evento 3 se puede corroborar lo mencionado anteriormente, como para numerosos pares de valores medidos y simulados, los valores simulados son menores a los medidos. Esto se da principalmente al no poder simular adecuadamente la rama descendente del hidrograma medido.

Se observa también que en general en todos los eventos que para los mayores caudales medidos se corresponde caudales simulados aún más grandes que los medidos

(se observan por encima de la línea identidad del gráfico) y luego para caudales menores, los caudales simulados son menores que los medidos (puntos por debajo de la línea identidad del gráfico). Esto se observa en todos los eventos en mayor o menor medida, exceptuando el evento 8.

Por lo tanto explicaríamos que para poder lograr un buen ajuste de los hidrogramas lo que se está haciendo es sobredimensionar levemente el pico de crecida y que luego las ramas de ascenso y descenso del hidrograma simulado están por debajo del hidrograma medido. Es decir, que la crecida simulada llega antes al punto de medición que la real y a la vez se evacúa también más rápidamente.

Aunque esto último pudiera indicar que se estaría utilizando en la calibración una rugosidad menor a la correcta para que la respuesta de la cuenca sea más lenta, se observa en el proceso de calibración que al utilizar una rugosidad mayor (ya sea de flujo laminar, de cauces o de conductos) el pico de crecida se demoraba en demasía en comparación al pico de crecida medido.

Luego de los análisis anteriores y de haber adoptado los valores de calibración, se procedió a la validación del modelo calibrado.

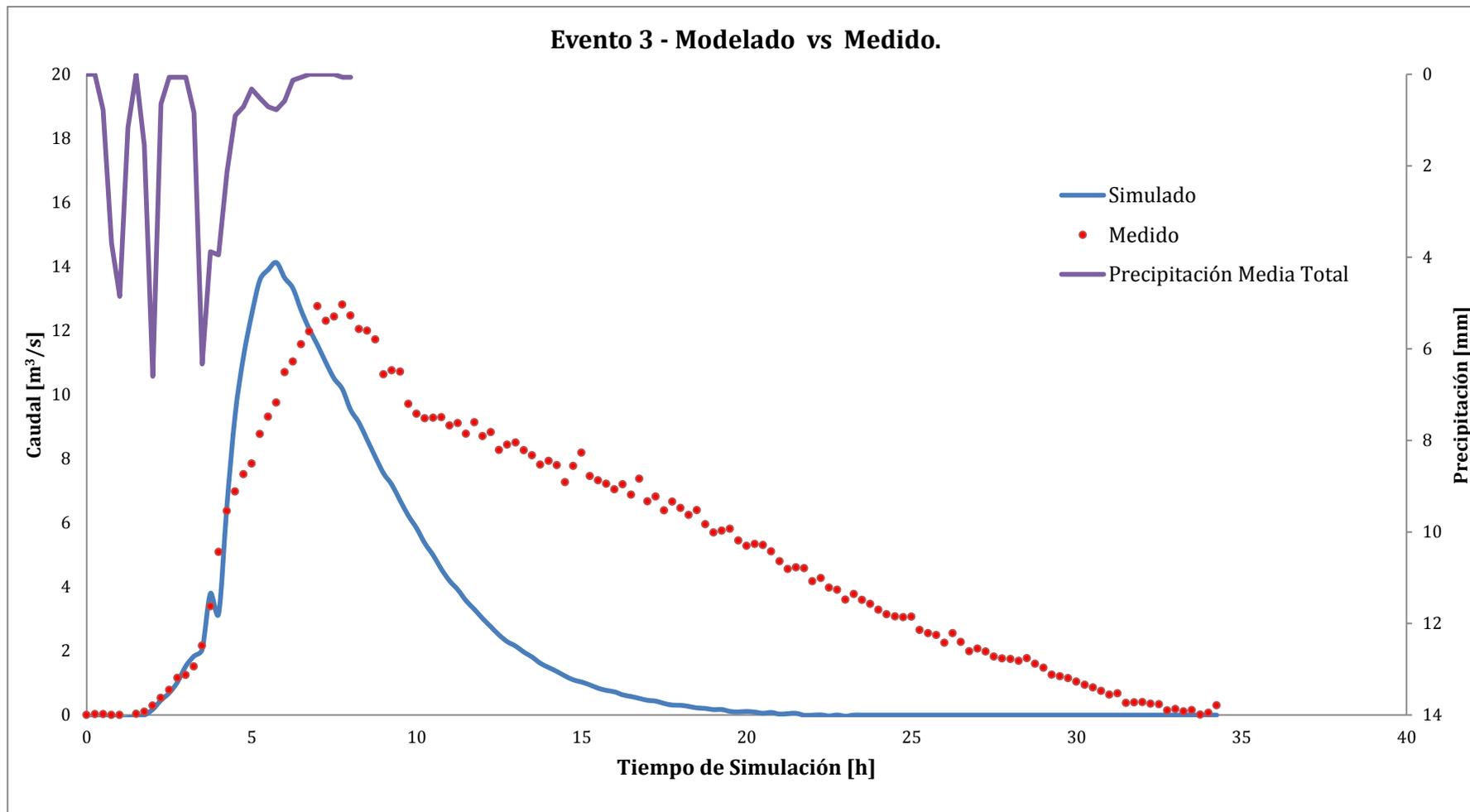


Figura 6-15 - Caudales simulados y caudales medidos en el evento 3.

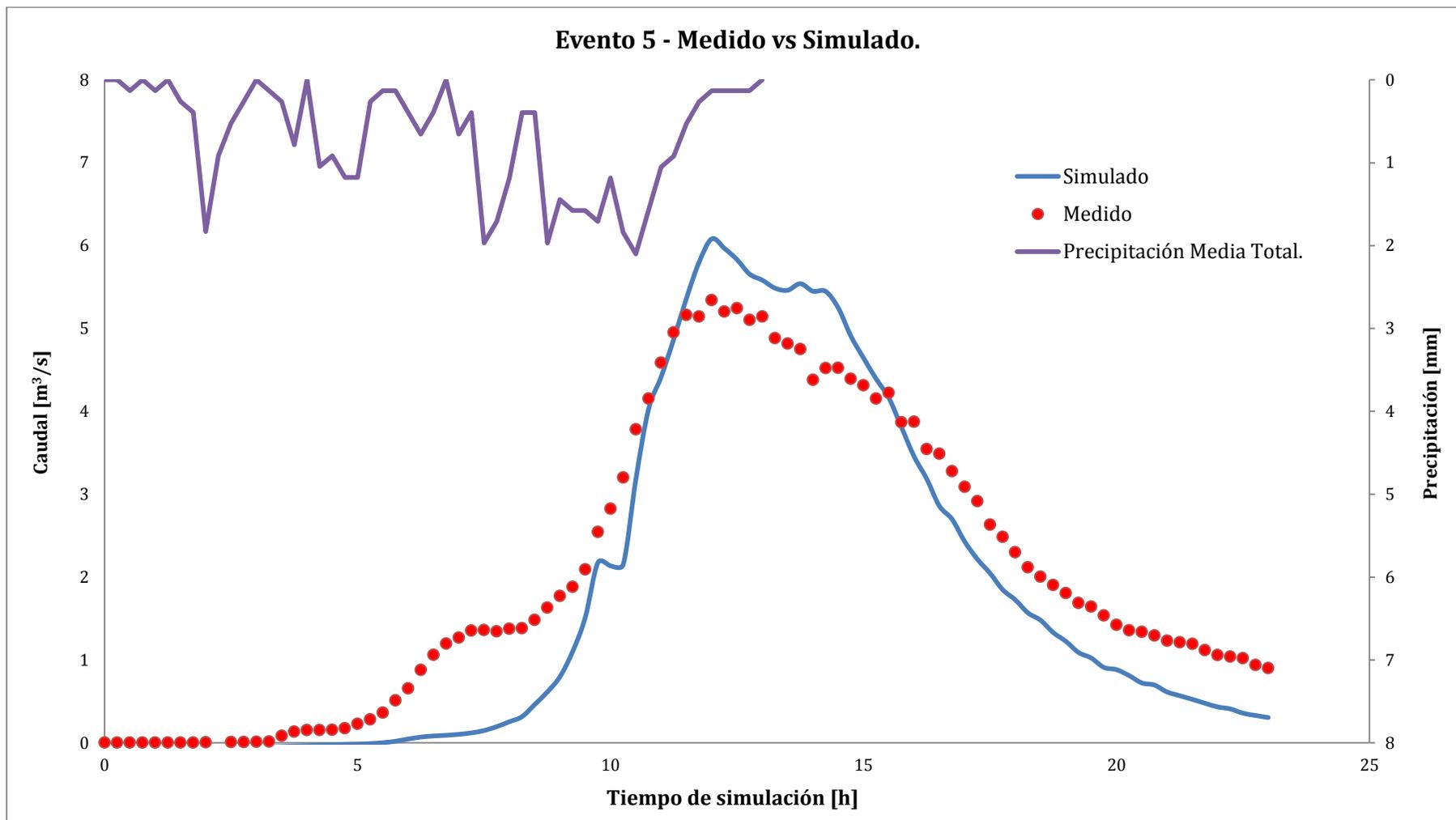


Figura 6-16 - Caudales simulados y caudales medidos en el evento 5.

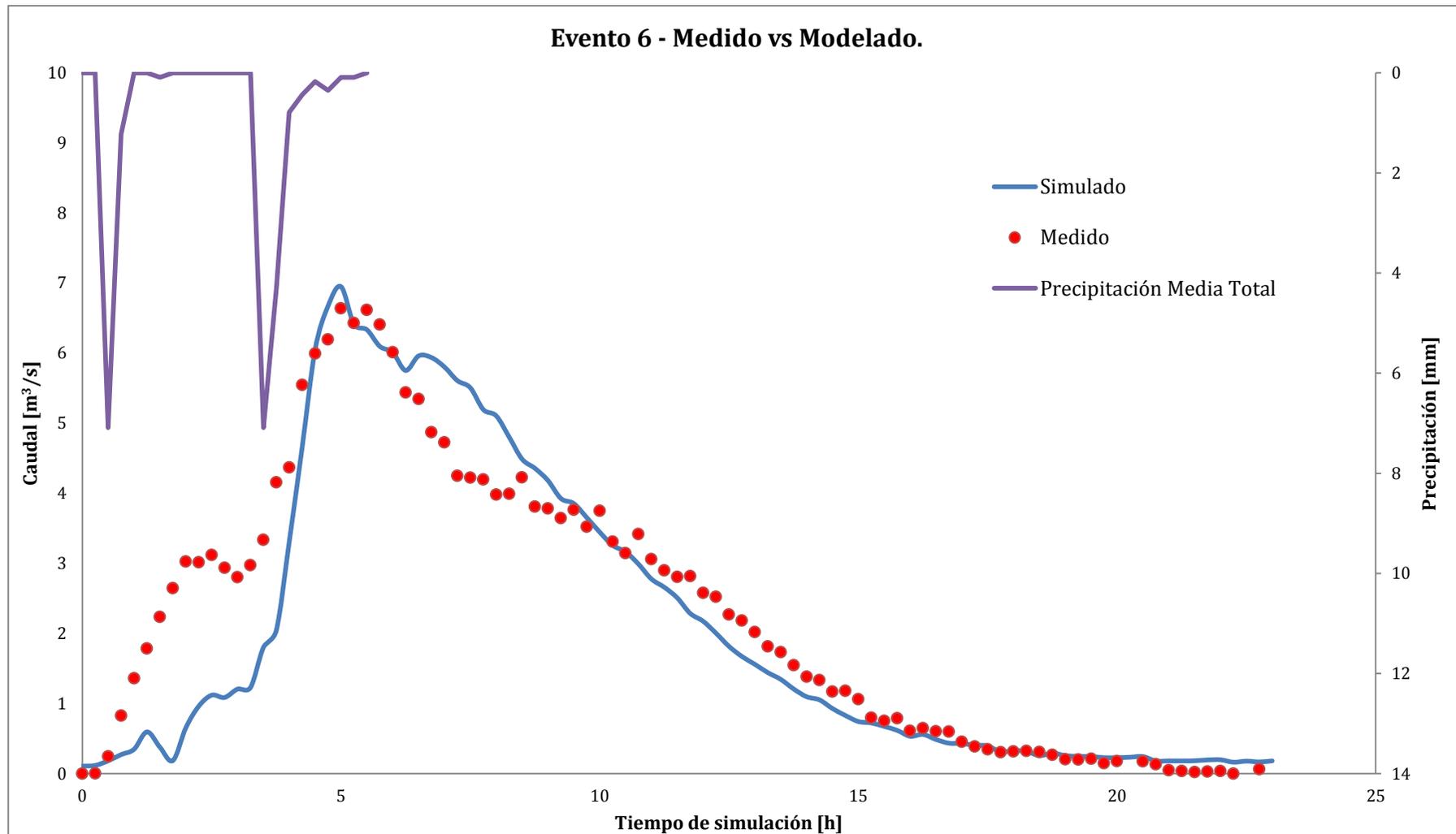


Figura 6-17 - Caudales simulados y caudales medidos en el evento 6.

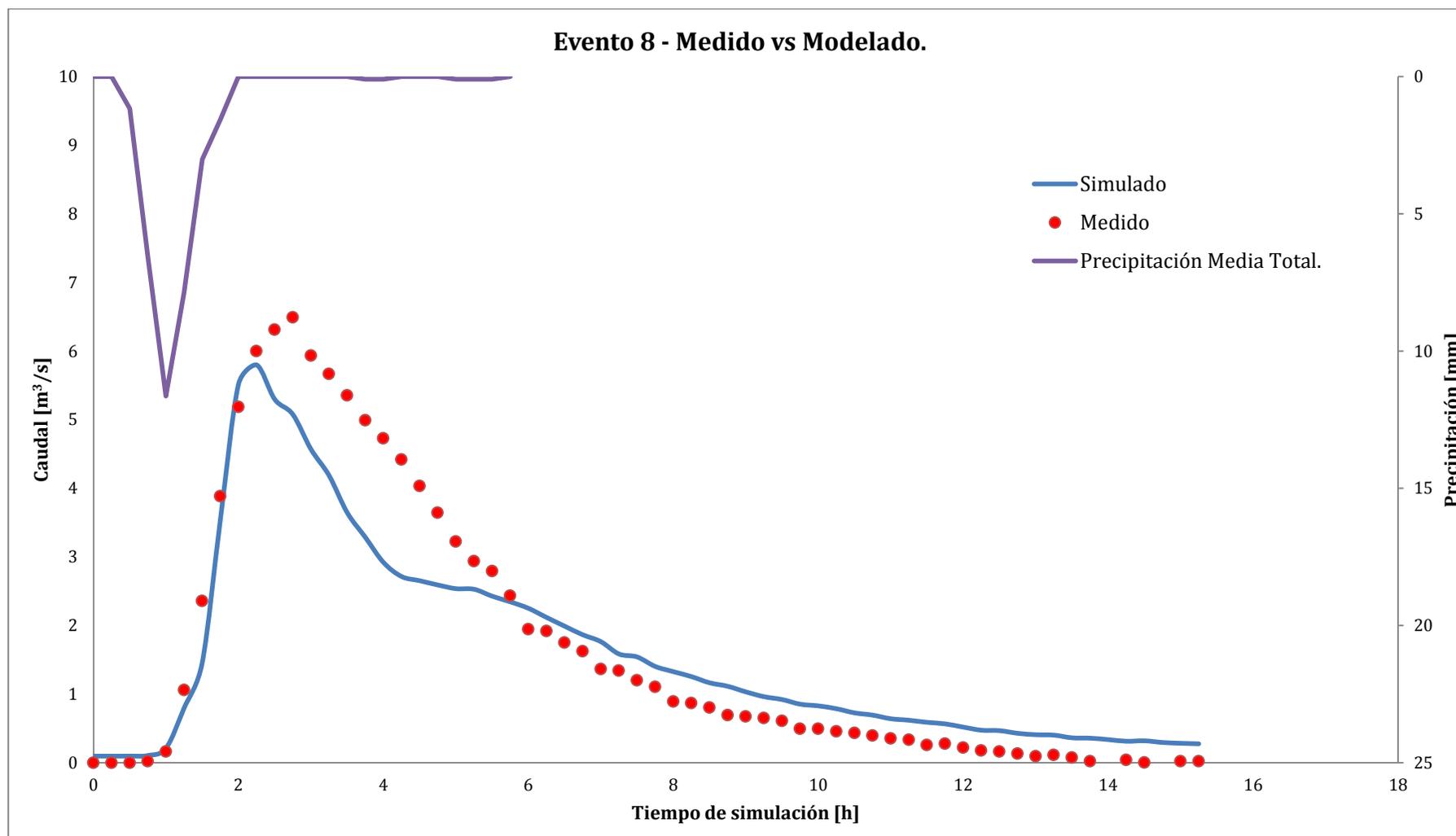


Figura 6-18 - Caudales simulados y caudales medidos en el evento 8.

MODELACIÓN HIDROLÓGICA-HIDRÁULICA TOTALMENTE DISTRIBUIDA DE UNA CUENCA FUERTEMENTE ANTROPIZADA – CASO DEL RÍO CASCAVEL
(GUARAPUAVA/PR, BRASIL)

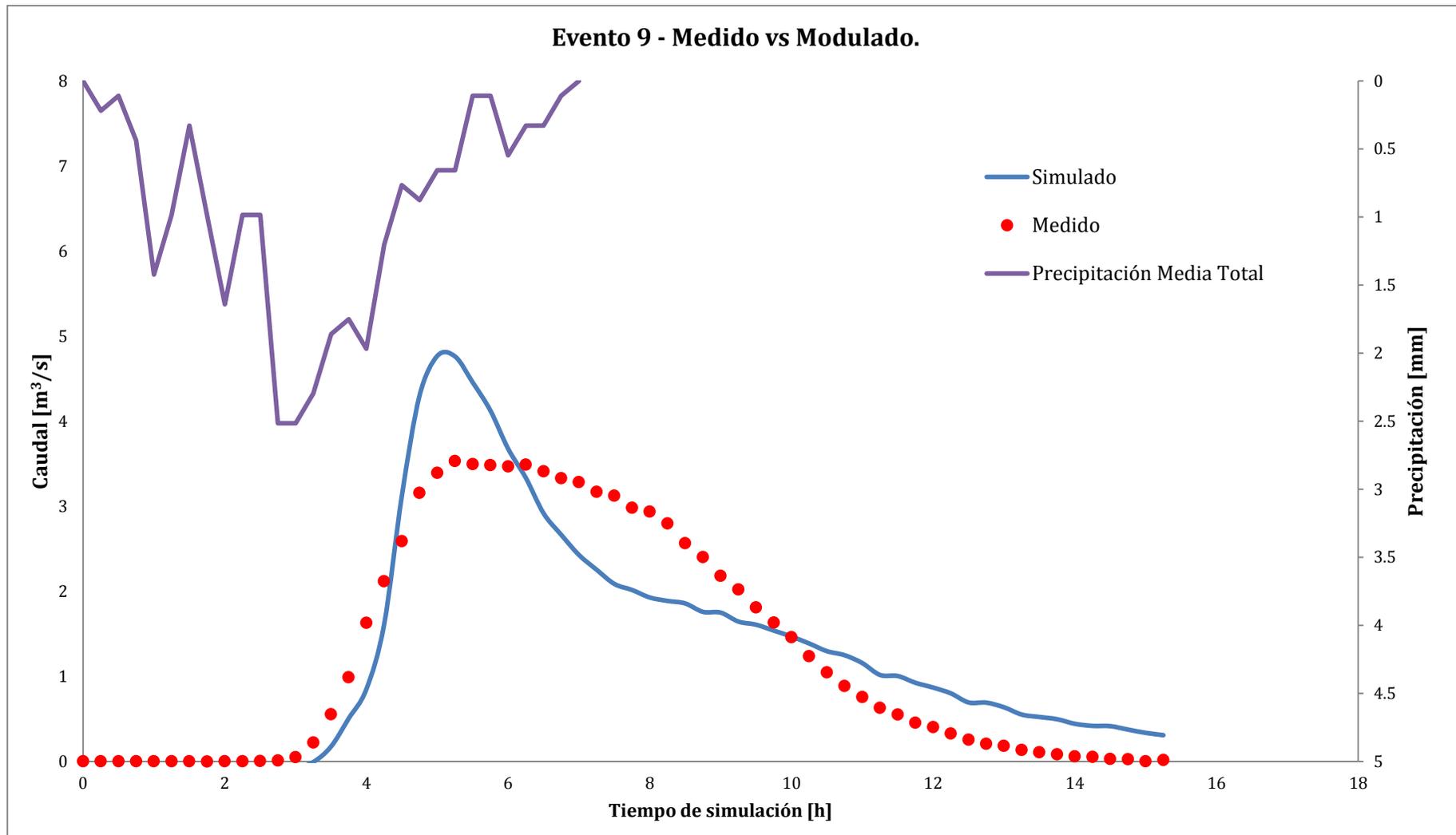


Figura 6-19 - Caudales simulados y caudales medidos en el evento 9.

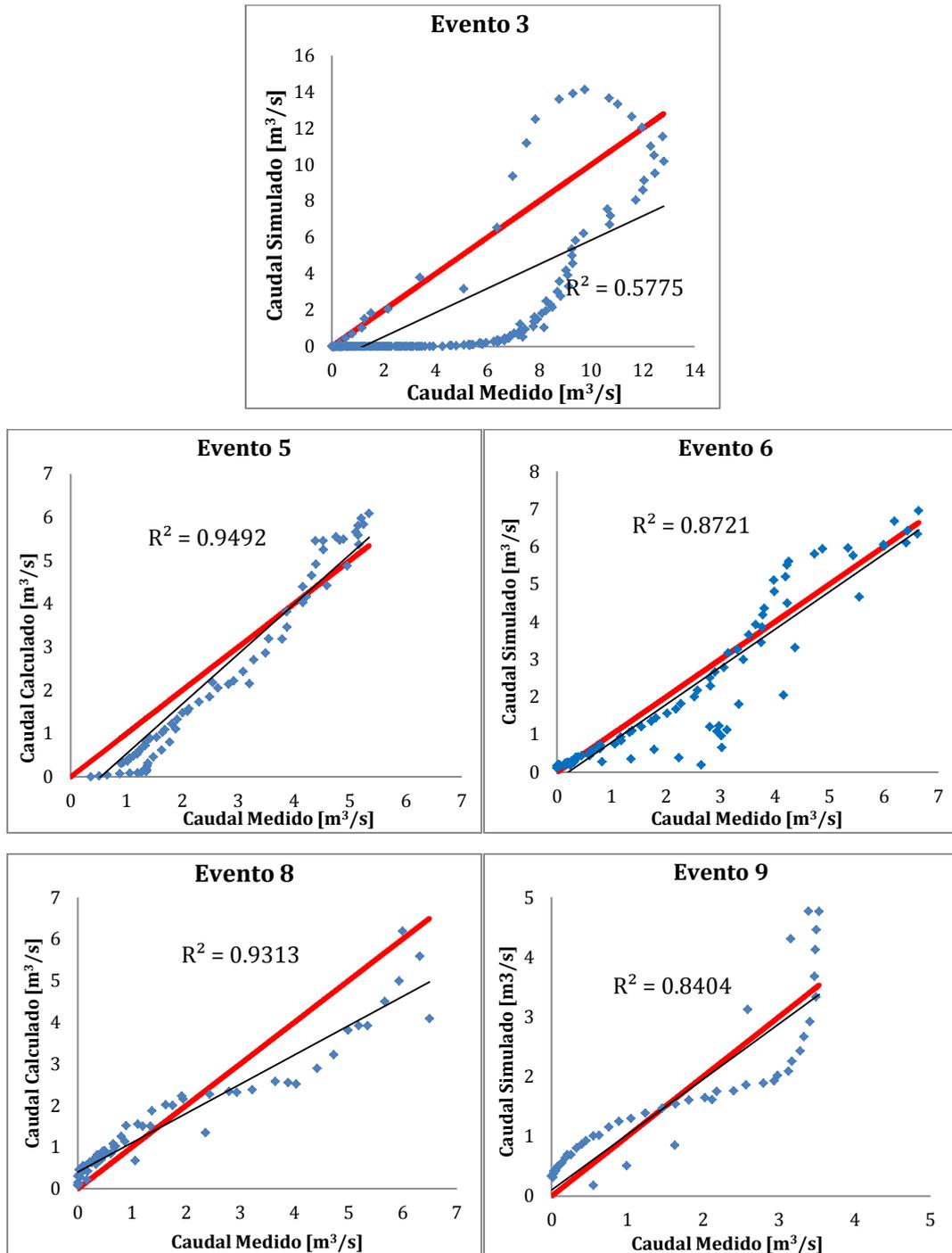


Figura 6-20 - Gráficos de correlación de cada uno de los eventos calibrados En rojo, la línea que representa un ajuste perfecto.

6.4. Validación del modelo calibrado

Luego de realizada la calibración del modelo TREX y SWMM se procedió a la validación del mismo. Para ello, se utilizaron los cinco eventos seleccionados precedentemente, en los cuales se utilizaron los valores de infiltración, rugosidad (en cuenca y cauces) e interceptación vegetal obtenidos de la calibración. Sin embargo, los valores de déficit de humedad debieron ser ajustados para cada uno de los eventos ya que este valor depende, como se mencionó anteriormente, de las condiciones antecedentes de humedad de la cuenca en el momento de llevarse a cabo los eventos.

A continuación en la Tabla 6-13, se encuentran los déficits de humedad ajustados para estos eventos utilizados para validar y los valores estadísticos para valorar el buen o mal ajuste de los valores calibrados.

Tabla 6-13 - Valores estadístico del ajuste obtenidos en los eventos de validación.

Evento	Fecha	R ²	NSE	PBIAS [%]	Media	Desviación estándar	Déficit de Humedad
Evento 10	21/07/2011	0,688	0,064	54,72	1,554	1,246	0,110
Evento 11	30/12/2012	0,971	0,939	8,83 %	0,414	0,643	0,120
Evento 12	15/11/2012	0,687	0,646	-5,75 %	0,109	0,330	0,030
Evento 13	03/11/2012	0,901	0,823	3,64 %	0,047	0,217	0,010
Evento 14	21/09/2012	0,676	0,621	-23,47 %	0,394	0,627	0,080

Como es de esperar, se obtienen valores en las funciones estadísticas para evaluar el ajuste menores a los obtenidos en la calibración. Sin embargo, existen eventos (como evento 11 y evento 13) en los cuales los valores estadísticos son del orden de magnitud de la calibración. Igual que en los eventos de calibración, se presentan a continuación el análisis de los volúmenes escurridos y caudales picos medidos y modelados (Tabla 6-14 y

Tabla 6-15). En lo que respecta a caudales pico, se comparan el valor del mismo y el tiempo de ocurrencia.

Del análisis de los valores se observa algunos aspectos en los eventos simulados. En el evento 10, se observa una diferencia del 12 % en los caudales picos, sin embargo una gran diferencia (más del 60 %) en los volúmenes escurrido, siendo en la simulación considerablemente menor el volumen al medido. En menor medida, se observar lo mismo en el evento 14. En estos casos, se puede inferir de manera similar que en el evento 3 (analizado en los eventos de calibración), que puede existir una diferencia en la distribución temporal de la lluvia adoptada para los pluviómetros.

Luego, en los evento 11, 12 y 13 se observa que las diferencias en los volúmenes escurridos medidos y simulados están por debajo al 10 %. Las diferencias de los caudales picos para estos eventos se encuentran igual o por debajo del 10 % salvo para el evento 13, donde el caudal pico simulado tiene una mayor diferencia con el medido, siendo este último mayor al simulado.

En cuanto al tiempo de ocurrencia del pico, las diferencias no exceden a la 1.25 horas entre lo simulado y lo medido.

Tabla 6-14 - Análisis de volúmenes escurridos y caudales picos medidos y simulados en los eventos de validación.

	Volumen Escurrido			Caudal Pico		
	Medido [m ³]	Simulado [m ³]	Diferencia [%]	Medido [m ³ /s]	Simulado [m ³ /s]	Diferencia [%]
Evento 10	206073.61	76062.04	-63%	5.5	4.85	-12%
Evento 11	261559.93	238470.42	-9%	10.07	9.46	-6%
Evento 12	105340.45	111216.92	6%	4.76	4.29	-10%
Evento 13	68965.60	72635.16	5%	4.28	3	-30%
Evento 14	93638.33	115615.37	23%	5.53	5.45	-1%

Tabla 6-15 - Tiempo de ocurrencia de caudal pico de crecida en hidrograma medido y simulado para los eventos de calibración.

	Tiempo de ocurrencia de pico.		
	Medido [horas]	Simulado [horas]	Diferencia [horas]
Evento 10	8.50	7.75	- 0.75
Evento 11	4.00	2.75	- 1.25
Evento 12	4.25	5.50	+ 1.25
Evento 13	2.75	3.50	+ 0.75
Evento 14	4.75	5.75	+ 1.00

Se presentan los gráficos (Figura 6-21, Figura 6-22, Figura 6-23, Figura 6-24 y Figura 6-25) de los hidrogramas simulados y medidos, en los cuales podemos observar las diferencias en los ajustes de cada uno de los eventos.

Como en los eventos de calibración, es posible apreciar los gráficos de correlación entre los caudales medidos y simulados (Figura 6-26).

Observando los gráficos de correlación mencionados anteriormente, no se registra una tendencia tan marcada como en los eventos de calibración en donde para los caudales mayores, los caudales simulados eran de mayor magnitud que los calibrados.

También se puede ver en el evento 12 y 14 como el todo hidrograma simulado pareciera que estuviera desfasado con respecto al medido, lo que también se refleja en los gráficos de correlación. Esto puede darse por los mismos motivos mencionados anteriormente; que la distribución temporal de las precipitaciones que se utilizó en la modelación no sea la correcta.

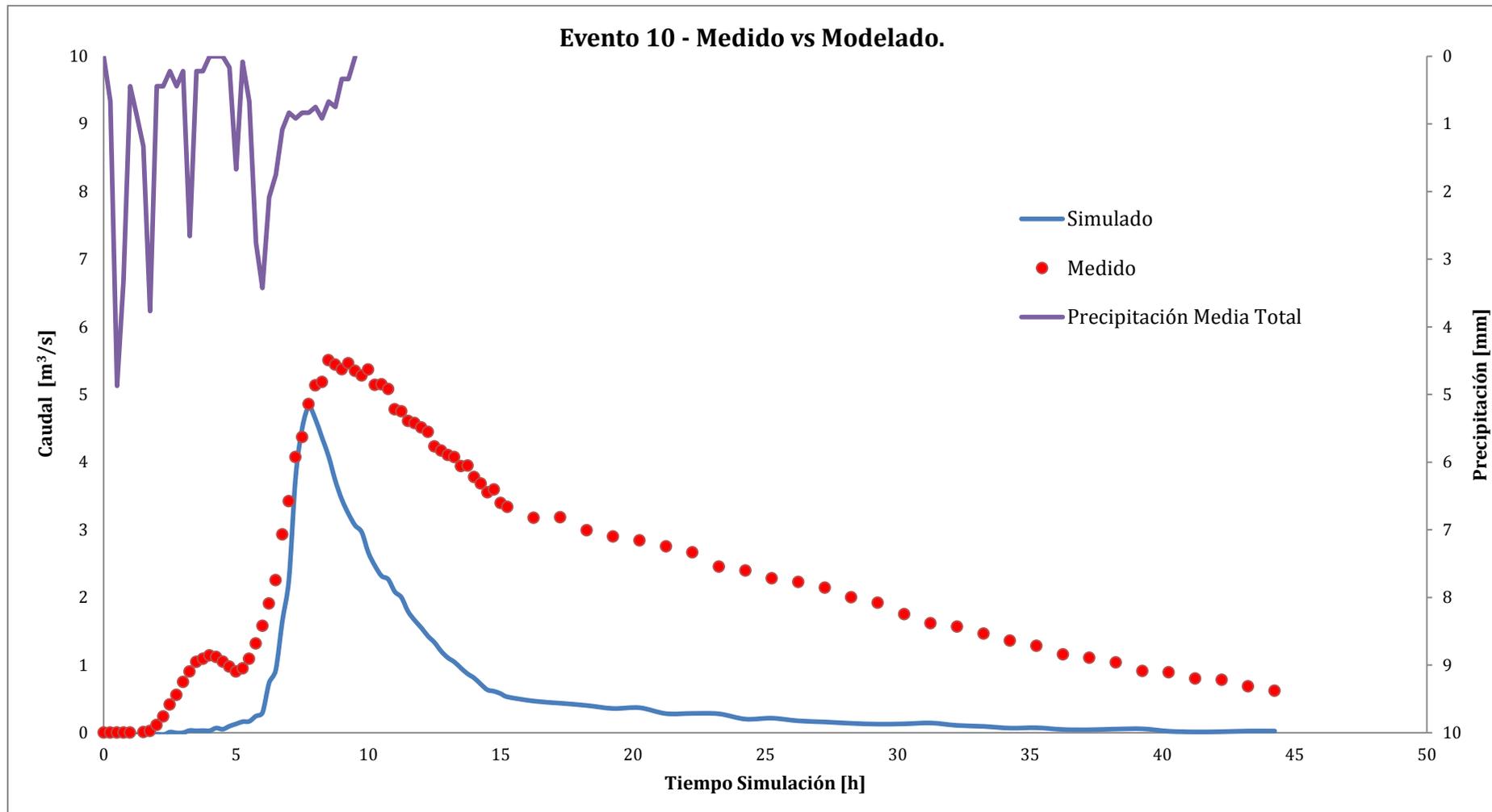


Figura 6-21 - Caudal simulado vs caudal medido para el evento de validación. Evento 10.

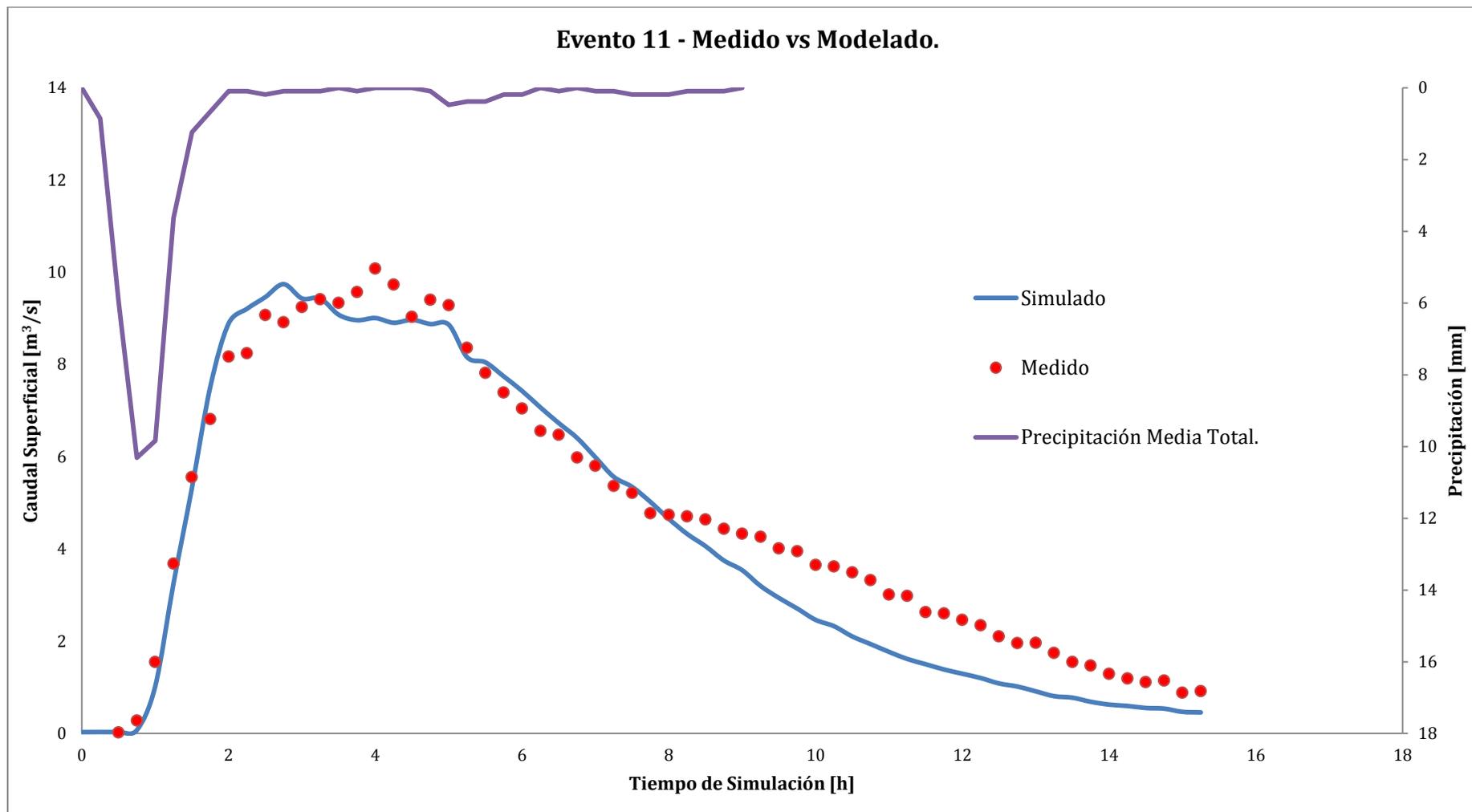


Figura 6-22 - Caudal simulado vs caudal medido para el evento de validación. Evento 11.

MODELACIÓN HIDROLÓGICA-HIDRÁULICA TOTALMENTE DISTRIBUIDA DE UNA CUENCA FUERTEMENTE ANTROPIZADA – CASO DEL RÍO CASCAVEL
(GUARAPUAVA/PR, BRASIL)

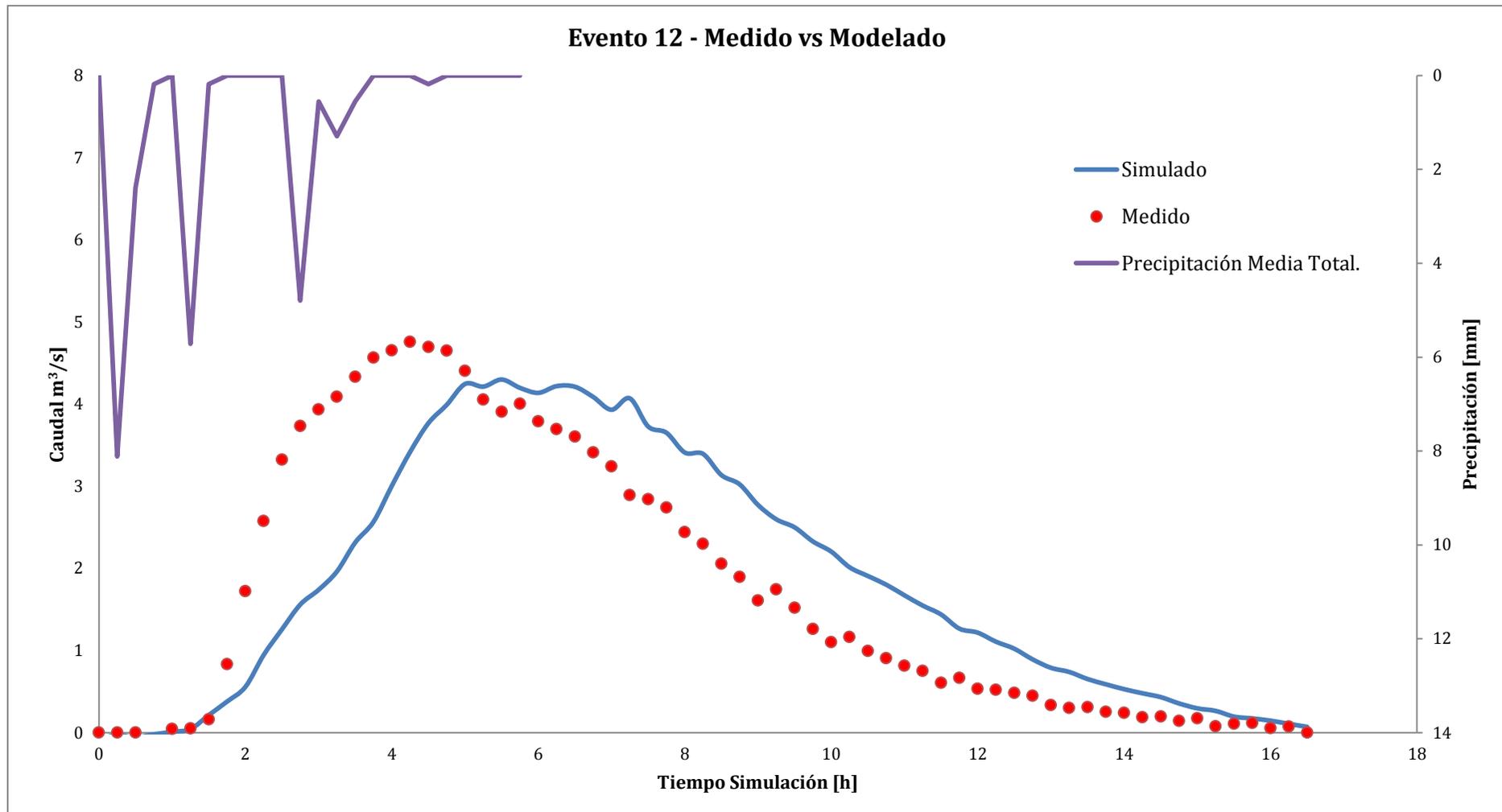


Figura 6-23 - Caudal simulado vs caudal medido para el evento de validación. Evento 12.

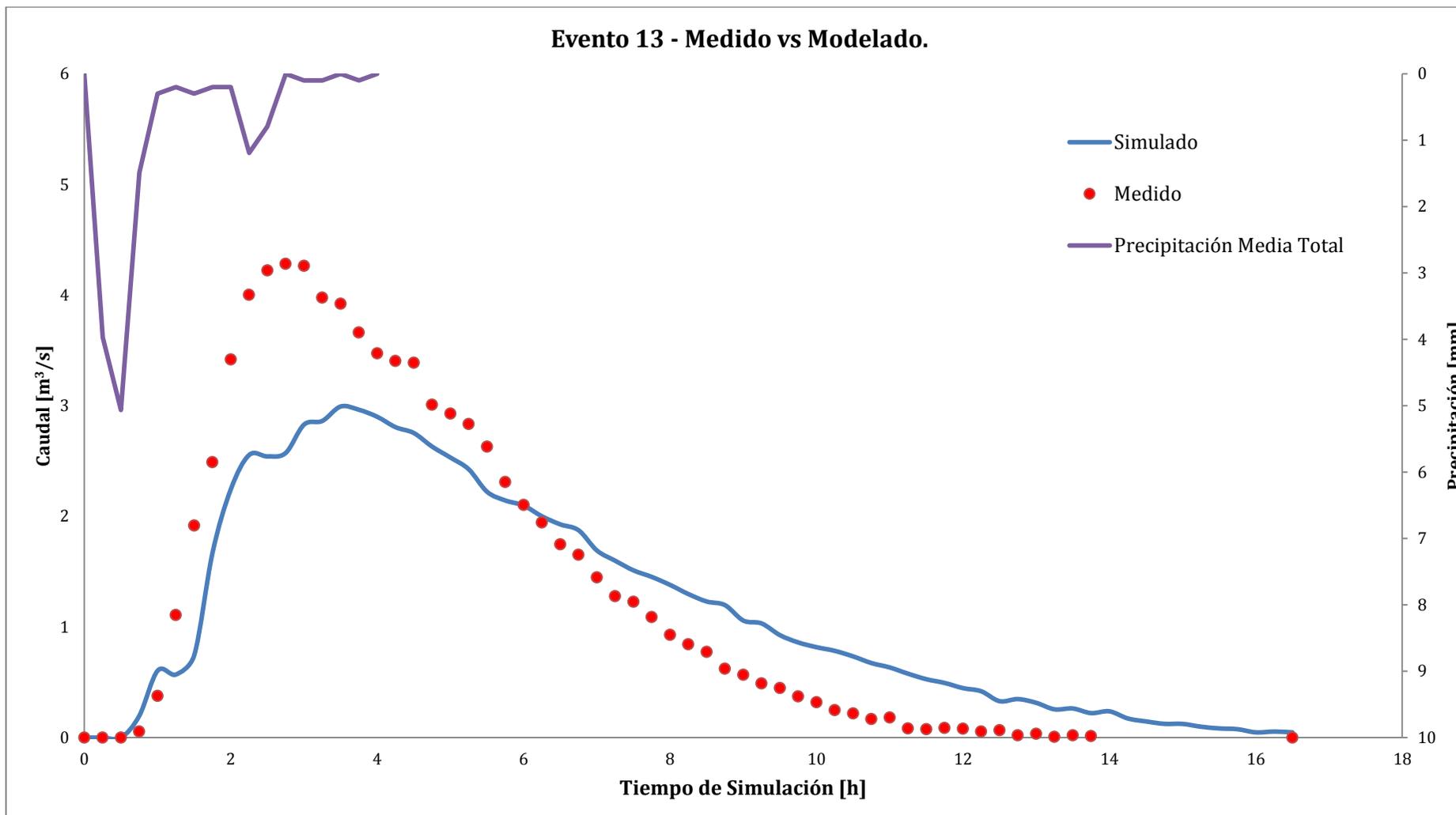


Figura 6-24 - Caudal simulado vs caudal medido para el evento de validación. Evento 13.

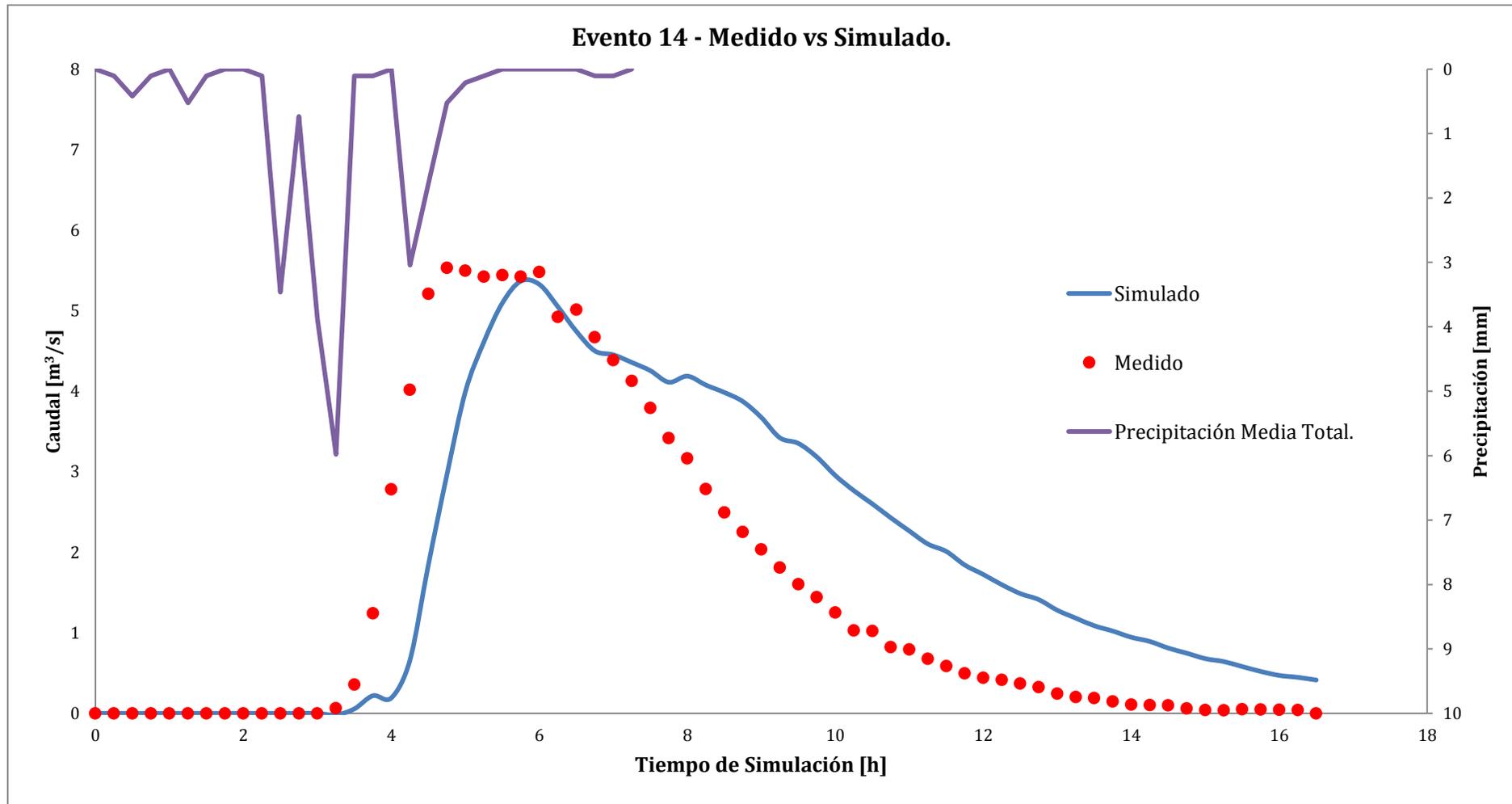


Figura 6-25 - Caudal simulado vs caudal medido para el evento de validación. Evento 14.

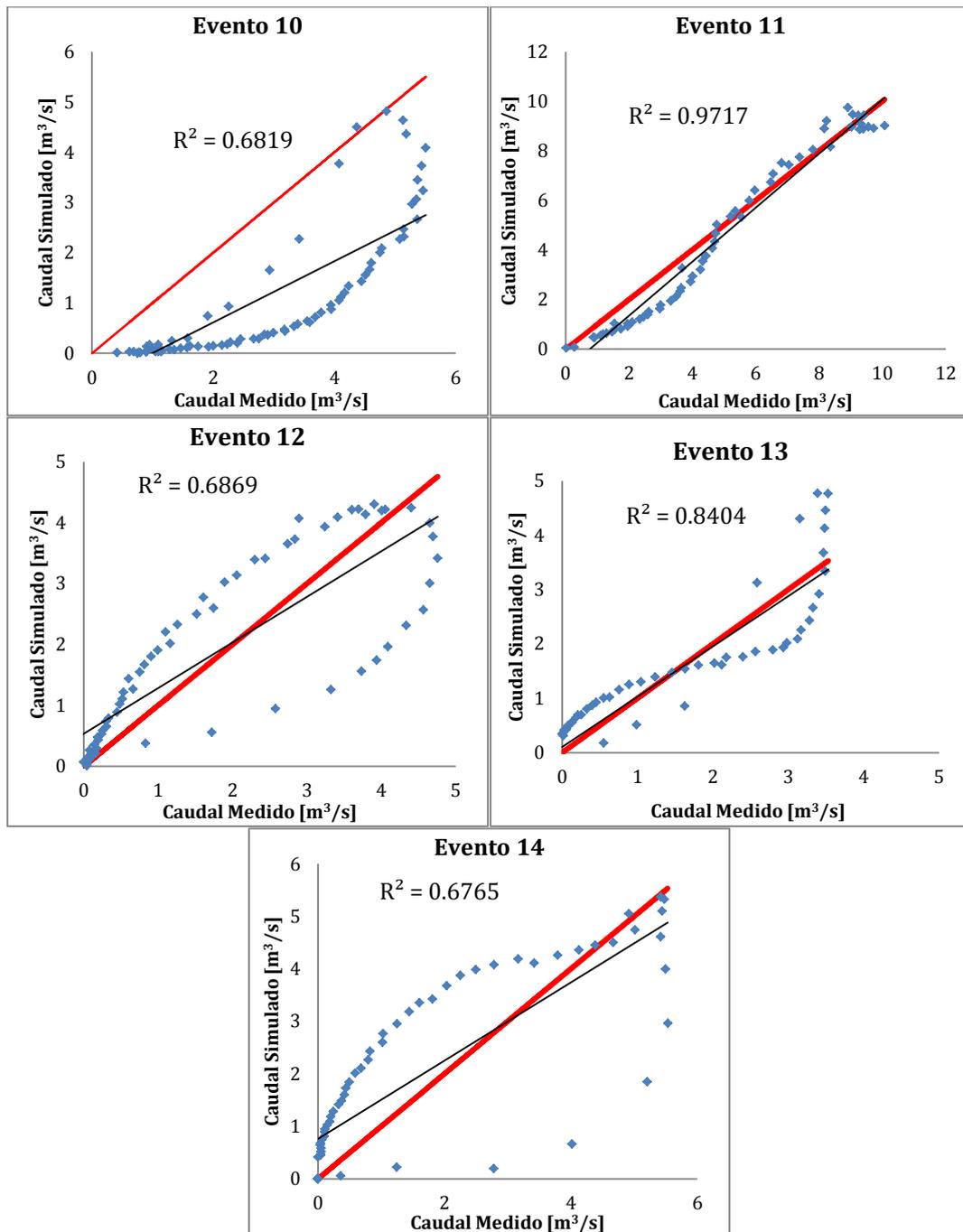


Figura 6-26 - Gráficos de correlación de cada uno de los eventos utilizados para la validación del modelo. En rojo la línea que representa un ajuste exacto.

6.5. Mapas resultados del modelo TREX y SWMM

A continuación, se presenta a modo de ejemplo imágenes que muestran la potencialidad de este tipo de modelo totalmente distribuido que permite obtener resultados en toda la extensión de la cuenca modelada y en cualquier momento de la simulación.

Se muestran los mapas (Figura 6-27, Figura 6-28, Figura 6-29, Figura 6-30, Figura 6-31 y Figura 6-32) de escurrimiento superficial de TREX y la salida general de SWMM para el mismo tiempo de simulación para el evento 6.

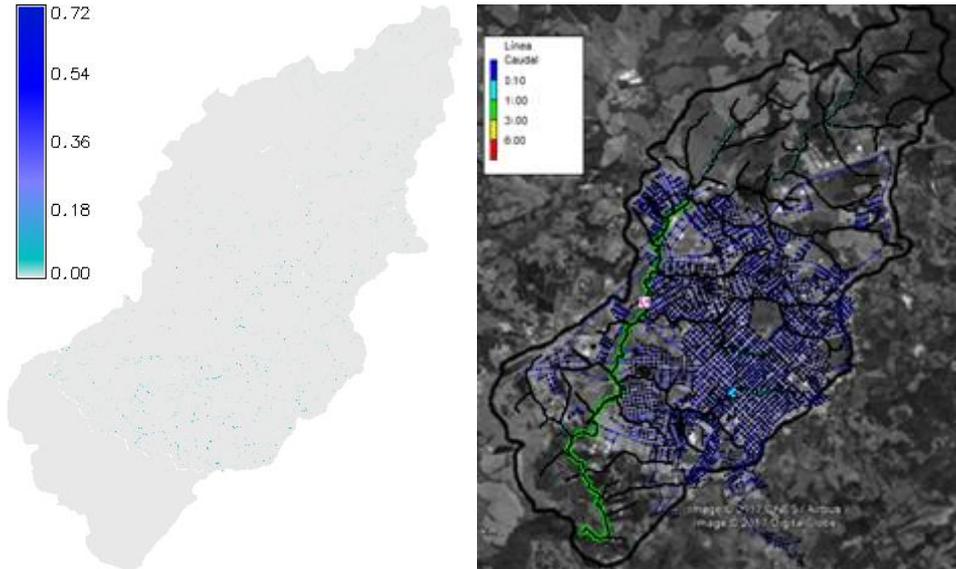


Figura 6-27 - A la izquierda altura de escurrimiento (m) para el Evento 6 en TREX. A la derecha caudal (m^3/s) en conductos y canales en SWMM. Tiempo: 1 hora.

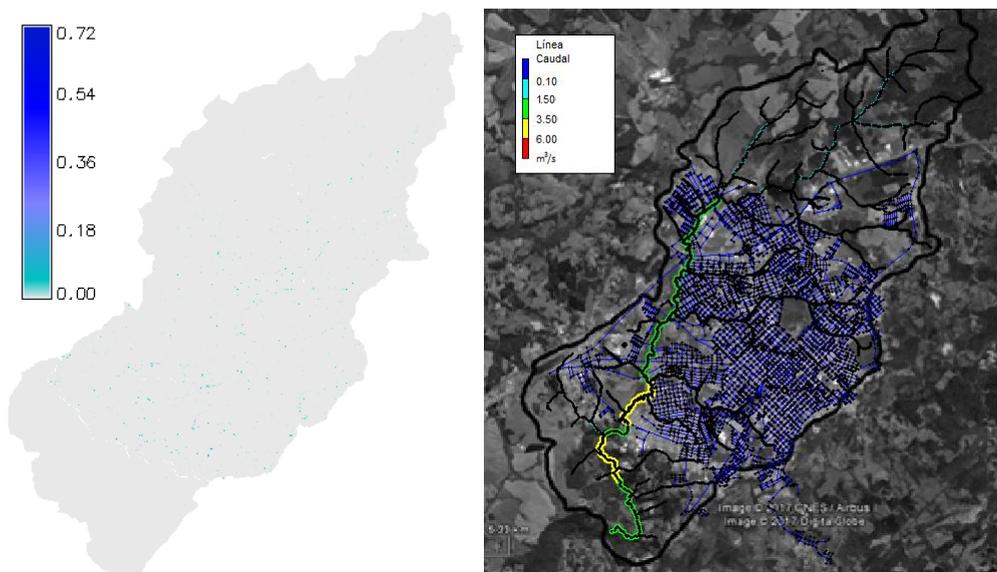


Figura 6-28 - A la izquierda altura de escurrimiento (m) para el Evento 6 en TREX. A la derecha caudal (m^3/s) en conductos y canales en SWMM. Tiempo: 2 horas.

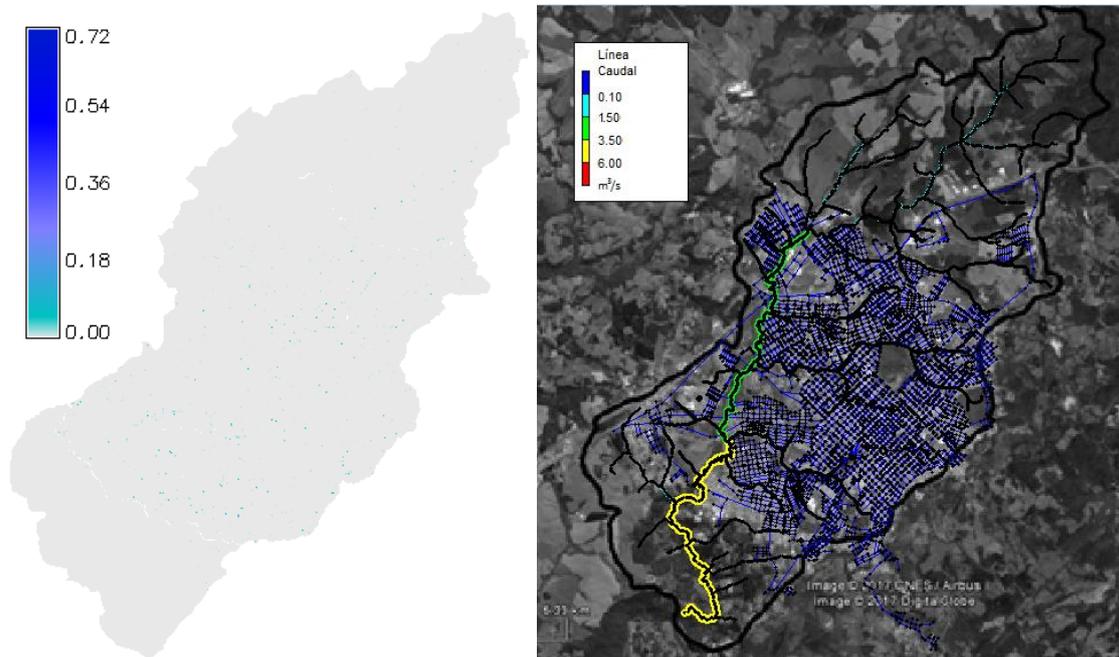


Figura 6-29 - A la izquierda altura de escurrimiento (m) para el Evento 6 en TREX. A la derecha caudal (m^3/s) en conductos y canales en SWMM. Tiempo: 3 horas.

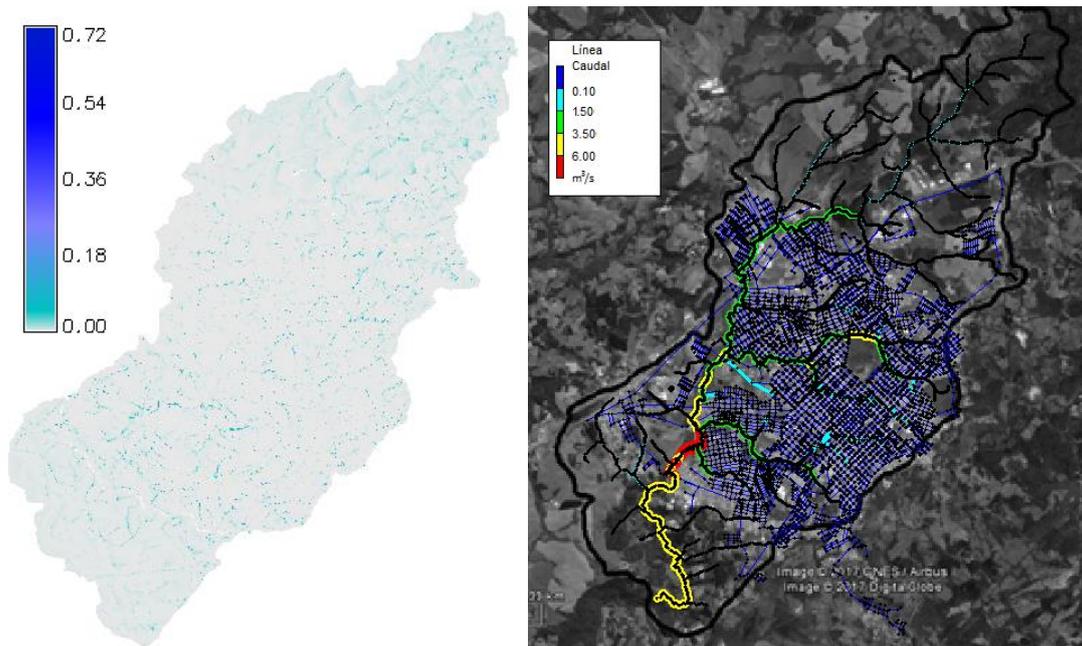


Figura 6-30 - A la izquierda altura de escurrimiento (m) para el Evento 6 en TREX. A la derecha caudal (m^3/s) en conductos y canales en SWMM. Tiempo: 4 horas.

MODELACIÓN HIDROLÓGICA-HIDRÁULICA TOTALMENTE DISTRIBUIDA DE UNA CUENCA FUERTEMENTE ANTROPIZADA – CASO DEL RÍO CASCAVEL (GUARAPUAVA/PR, BRASIL)

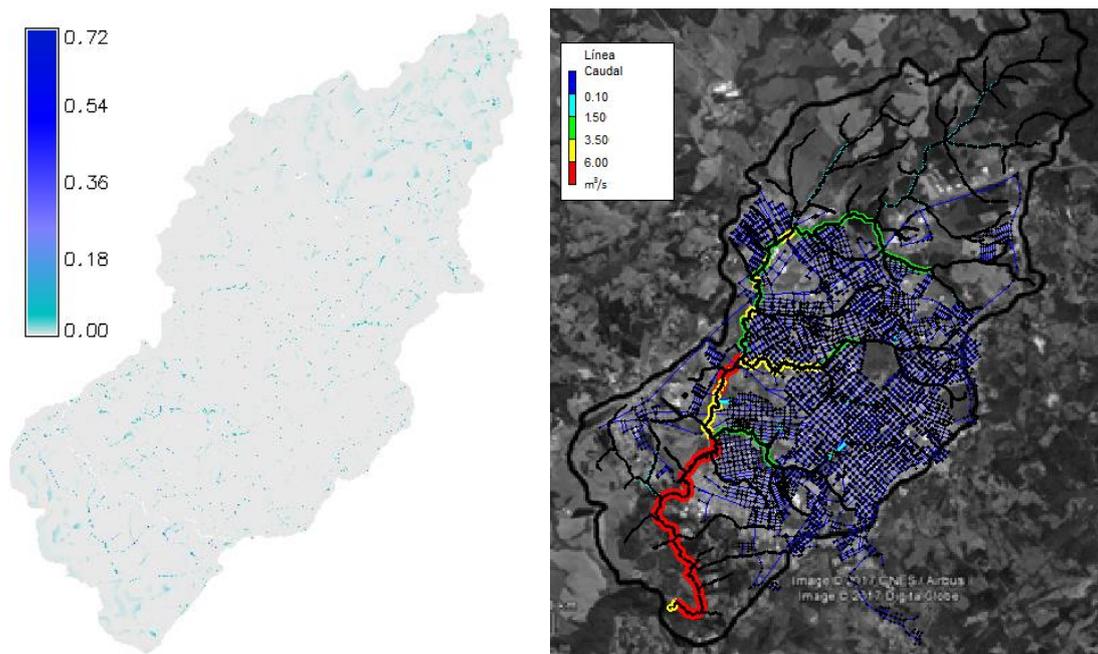


Figura 6-31 - A la izquierda altura de escurrimiento (m) para el Evento 6 en TREX. A la derecha caudal (m^3/s) en conductos y canales en SWMM. Tiempo: 5 horas.

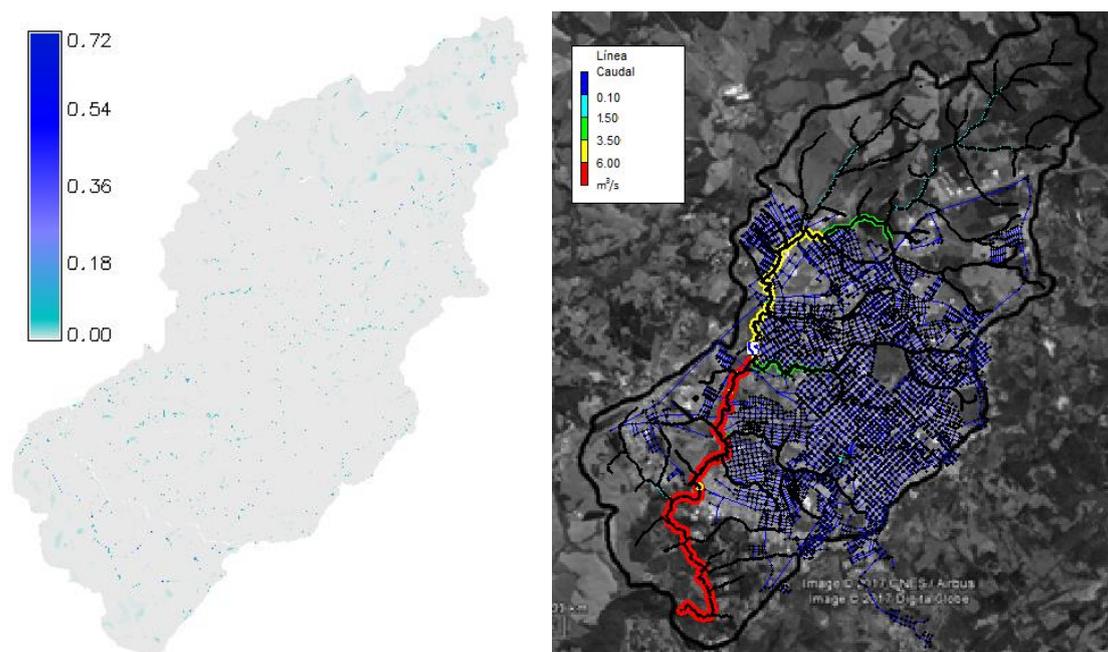


Figura 6-32 - A la izquierda altura de escurrimiento (m) para el Evento 6 en TREX. A la derecha caudal (m^3/s) en conductos y canales en SWMM. Tiempo: 6 horas.

Por otro lado para el mismo evento, se puede apreciar más en detalle la altura de escurrimiento en una zona de la cuenca y visualizar allí las calles anegadas, valles de inundación, escurrimientos, etc. (Figura 6-33).

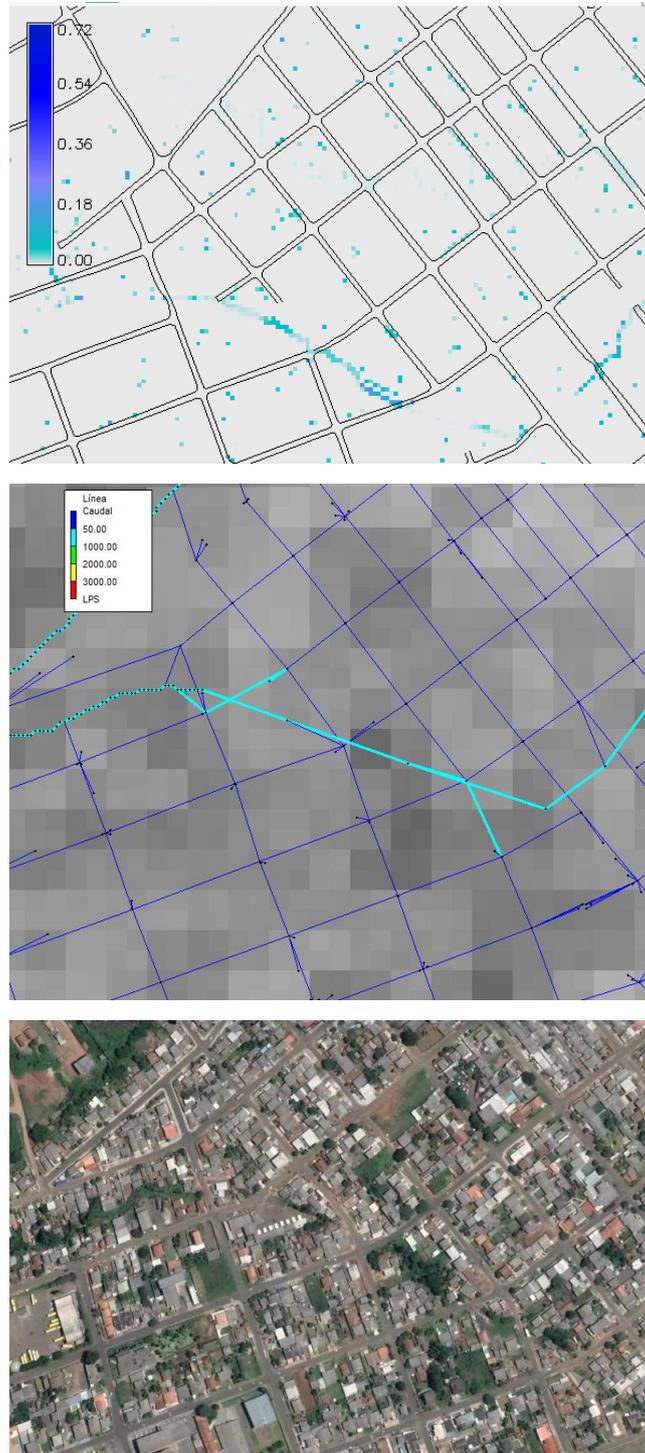


Figura 6-33 - Arriba vista de altura de escurrimiento en TREX para el Evento 6 en un sector de la subcuenca Barro Preto. En el centro vista de SWMM del mismo sector. Tiempo: 4 horas. Abajo vista de imagen satelital del sector visualizado en TREX y SWMM.

MODELACIÓN HIDROLÓGICA-HIDRÁULICA TOTALMENTE DISTRIBUIDA DE UNA CUENCA FUERTEMENTE ANTROPIZADA – CASO DEL RÍO CASCAVEL (GUARAPUAVA/PR, BRASIL)

Por último, es posible obtener en SWMM, para el mismo evento, para cada uno de los conductos, canales y cauces el caudal evacuado al transcurrir la simulación.

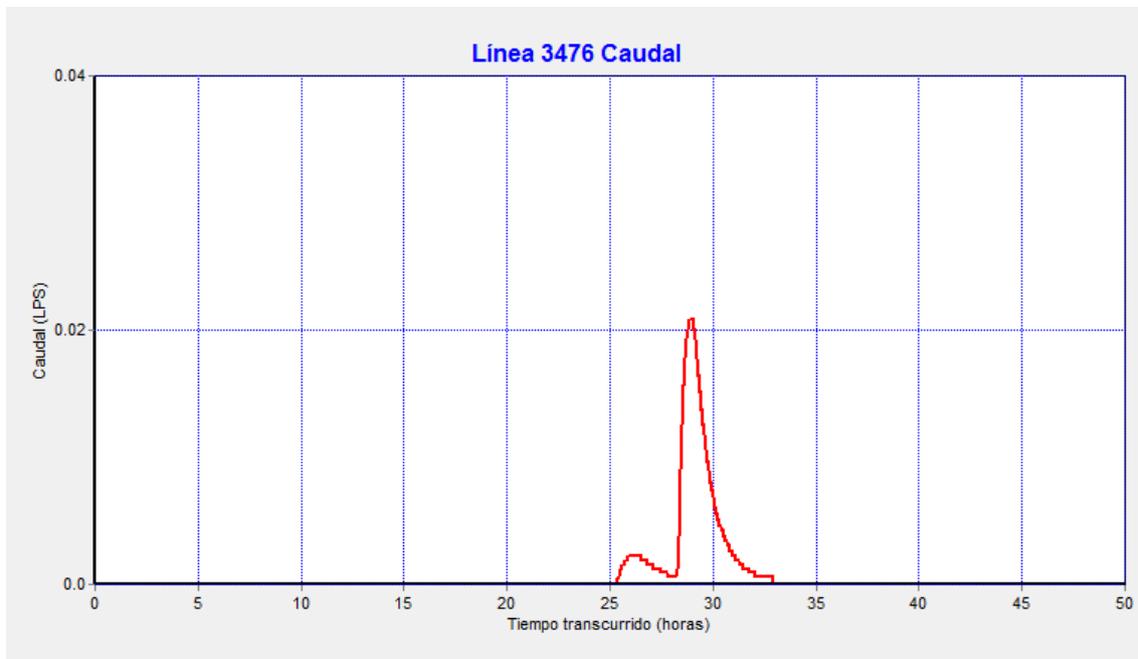
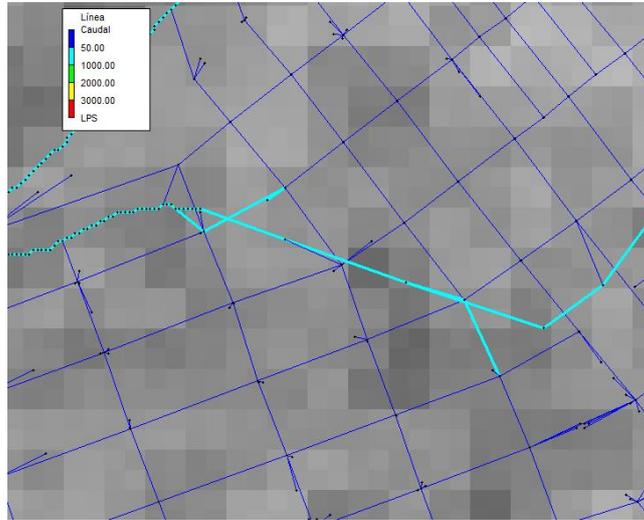


Figura 6-34 - Visualización de caudal en conducto visualizado en SWMM.

Capítulo 7: Conclusiones y productos

7.1. Conclusiones

7.1.1. Conclusiones generales

A través del uso de los programas TREX y SWMM se logró realizar la calibración y validación de un modelo totalmente distribuido en una cuenca fuertemente antropizada, pudiéndose simular todos los elementos característicos típicos del área urbana que se encuentra en la misma.

El procedimiento del trabajo en conjunto planteado entre un modelo totalmente distribuido como TREX y un modelo semi distribuido como SWMM, tuvo buenos resultados en la modelación del sector urbano. Esto sigue la línea de las últimas investigaciones en modelación distribuida en áreas urbanas. Para la aplicación de este procedimiento, fue necesario la modificación parcial del código fuente del modelo TREX.

Los resultados de la calibración de ambos modelos funcionando en conjunto se pueden considerar aceptables teniendo en cuenta los valores que fueron reflejados en los indicadores de ajuste. Los resultados de la validación, teniendo en cuenta nuevamente los indicadores de ajuste, fueron levemente de menor calidad según cada evento con respecto a los eventos de calibración, lo que es natural.

Por lo tanto, se logró obtener un modelo totalmente distribuido de la cuenca del Río Cascavel que refleja de manera aceptable su comportamiento y es posible obtener resultados en cada uno de los puntos de la cuenca, ya sea de escurrimientos superficiales, caudales en conductos, en cauces naturales, etc. De esta forma, es posible analizar casos puntuales de inundaciones, anegamientos o capacidades de conductos en toda la extensión de la cuenca.

El trabajo permitió observar distintas dificultades que se presentan en la modelación hidrológica totalmente distribuida en una cuenca urbana como por ejemplo:

a- Aunque puede ser una constante en las cuencas de nuestro ámbito Latinoamericano, se verificó la incertidumbre que existe por la baja calidad de algunos de los datos de entrada del modelo como ser: modelo digital de elevación, desconocimiento de ubicación, tamaño y disposición de los conductos de red de drenaje (por la inexistencia de documentación del mismo, como ser planimetría de ubicación, diámetros, pendientes, etc., solo fueron obtenidos los datos del relevamiento visual del equipo del Profesor Leandro Vestena de UNICENTRO), datos de precipitación que fueron estimados en su distribución temporal y escasos en su distribución espacial.

b- El gran tiempo computacional requerido para la simulación de las cuencas urbanas al utilizar una resolución de 5 metros que fue elegida para representar lo mayor fielmente las calles, construcciones y demás elementos del ámbito urbano.

c- Las modificaciones necesarias en los datos de ingreso, principalmente el MDE para poder representar lo más fielmente las diferencia de nivel de las calles con respecto al terreno natural, a las parcelas, las barreras materializadas por construcciones o

terraplenes. Estos elementos, por lo general no se encuentran identificados en los MDE más comúnmente a disposición.

Sin embargo, a su vez al utilizar un modelo totalmente distribuido se facilita el uso de dichos datos en formato ráster (uso de suelo, tipo de suelo, MDE, incluso precipitaciones). Siendo este tipo de formato de datos cada vez más común y de más fácil acceso. De esta forma se facilita la creación del modelo a simular ya que, de existir la información de manera completa, se puede ingresar y generar el modelo de simulación de manera casi directa.

7.1.2. Conclusiones particulares

Se considera que la elección del modelo matemático distribuido TREX y el modelo semidistribuido SWMM para realizar el análisis del trabajo fue buena. Esto es, principalmente por la relación de TREX con los Sistemas de Información Geográfica que permite el procesamiento de los datos para adecuarlos a representar los elementos de las cuencas urbanas. Y por otro lado, el modelo SWMM que permite una óptima modelación del flujo en cañerías, canales y embalses.

El hecho de usar el modelo totalmente distribuido TREX para la simulación de la transformación lluvia-caudal y escurrimiento superficial, que divide la cuenca en celdas de igual tamaño, permite el uso de mapas raster como ingreso al modelo. Esta forma de generar el modelo de simulación facilita y agiliza los tiempos, ya que los datos necesarios como ser modelo digital de elevación, uso de suelo y tipo de suelo entre otros, generalmente se obtienen en estos formatos. Aunque en este caso dichos datos puede que no hayan sido de una buena calidad, los procesamientos y correcciones realizados en ellos también se facilita con el formato raster de los mismos. Todo esto genera una ventaja considerable en comparación con modelos semi-distribuidos donde la generación del modelo de simulación no se realiza de manera tan directa.

Por otro lado, las potencialidades del modelo distribuido TREX y su característica de código fuente abierto, pudo aprovecharse al modificarse levemente el código para poder implementarlo en una cuenca urbana. El cambio del código fuente se considera correcto para poder implementar la modelación de las bocas de tormenta con TREX, lo mismo fue verificado con ejemplos teóricos obteniendo buenos resultados.

Se desarrolló un proceso para trabajar en conjunto con los modelos TREX y SWMM. El proceso consistió en primer lugar, en simular la transformación lluvia-escorrentía y la escorrentía superficial en el modelo TREX. También en este modelo se simuló cómo el flujo ingresa a las bocas de tormenta aprovechando el cambio de código fuente realizado previamente y cómo ingresa a los cauces o lagunas de retención. Esto último, no utilizando los elementos cauces del modelo TREX sino generando celdas en las que se infiltra la totalidad del flujo que llegan a ella. Por otro lado, en SWMM se simulan el flujo en canales abiertos y cerrados, conductos y sectores de regulación teniendo como dato de ingreso los caudales captados en el modelo TREX.

MODELACIÓN HIDROLÓGICA-HIDRÁULICA TOTALMENTE DISTRIBUIDA DE UNA CUENCA FUERTEMENTE ANTROPIZADA – CASO DEL RÍO CASCAVEL (GUARAPUAVA/PR, BRASIL)

De esta manera se implementó el modelo TREX previamente modificado y SWMM a la cuenca del río Cascavel, en Brasil. Por lo tanto, la aplicación fue en el aspecto hidrológico tanto teniendo en cuenta los elementos superficiales (modelados con TREX) como los elementos hidráulicos del sistema de drenaje (modelados con SWMM), no habiendo inconvenientes en el funcionamiento del modelo y en el procedimiento adoptado. Para esto último se generaron distintos programas para la automatización de la creación de los archivos de ingreso en SWMM a partir de los resultados de TREX.

Con respecto a la calidad de la calibración y validación del modelo en función a las funciones que evalúan el ajuste ya se mencionó en la sección 7.1.1 siendo de buena calidad en la calibración que en la validación.

Sin embargo, se encontraron algunos inconvenientes en la modelación en TREX y SWMM y que pudieron afectar a los resultados de la calibración y modelación de la cuenca del Río Cascavel fueron:

1 – Incertidumbre en los datos de precipitación. Por un lado, existe una baja distribución espacial de las estaciones disponibles. Por otro lado, se forzó una distribución temporal de los datos diarios de precipitación de las estaciones pluviométricas relacionándolos con la distribución temporal de la estación pluviográfica disponible.

2 – A pesar de la gran resolución espacial adoptada, los datos de caudales medidos utilizados para calibrar el modelo se encontraron en un solo punto. Es natural suponer que los valores locales no sean representativos de lo que pasa localmente.

3 – Existe una incertidumbre en la traza, forma y tamaño de los conductos que forman parte de la red de drenaje pluvial de la localidad de Guarapuava. Se pudo relevar la ubicación de las bocas de tormenta, pero no se pudo contar con mayores datos de conducciones por lo que se adoptó una red de malla tipo “looped network”. La forma de la red de conducto, la sección y la forma de los mismos pueden influir en la repuesta de la red ante un evento de tormenta.

4 – Se realizaron modificaciones en el MDE para evitar la acumulación de escurrimiento debido a “errores”, puntos bajos inexistentes en los MDE o efecto de barreras. Estas modificaciones fueron de manera arbitraria para que el modelo funcione de mejor manera.

5 – En la cuenca del Río Cascavel existen diversas lagunas; se observa que algunas están conectadas a la red de drenaje y escurrimiento y otras no. Se simularon aquellas que estaban conectadas a la red, sin embargo, es difícil establecer la condición inicial de las mismas para un evento. Se realizó una estimación según imágenes satelitales pero no es un método preciso.

Todo lo anterior, influye en las condiciones iniciales y en la modelación hidrológica de un evento en la cuenca del Río Cascavel poniendo en evidencia lo que es general en nuestra región y nuestra cuenca. Por lo tanto, se observa nuevamente la importancia de contar con datos de muy buena calidad para poder implementar un modelo totalmente distribuido de una cuenca urbana como se realizó en este trabajo.

Finalmente, un punto a tener en cuenta al realizar una modelación hidrológica distribuida en una cuenca urbana es la resolución adoptada para la misma. En este trabajo se utilizó una resolución de 5 m x 5 m para las subcuencas urbanas y de 30 m x 30 m para las subcuencas rurales. Se observó que en ambos casos, el modelo TREX modificado funcionó correctamente. Por un lado, no se observaron inconvenientes computacionales al correr el modelo (las modelaciones no abortaron prematuramente por alguna inconsistencia en el software) y por otro lado, los resultados fueron coherentes con los verificados en los ejemplos sencillos que se utilizaron para validar las modificaciones del código fuente de TREX.

Un punto a tener en cuenta es que a pesar del buen funcionamiento del modelo TREX modificado y el procedimiento adoptado para aplicar el modelo en conjunto con SWMM a la cuenca del Río Cascavel, los tiempos computacionales requeridos hacen impráctico con la tecnología disponible actualmente el uso de estos modelos, procedimientos y resoluciones adoptadas para el uso cotidiano de los mismos en cuencas de estos tamaños. Es por ello, que se debe evaluar usar los modelos y el procedimiento propuesto para cuencas urbanas más pequeñas o de otra manera para cuencas urbanas de igual tamaño pero con una resolución menor.

7.1.3. Conclusiones finales

- La modelación hidrológica totalmente distribuida es una herramienta adecuada y que tiene grandes potencialidades para estudiar la respuesta de una cuenca urbana ante un evento de tormenta.
- La modelación hidrológica totalmente distribuida de celdas de cuencas urbanas requiere un enfoque distinto en cuanto a la modelación de cuencas rurales por distintos motivos como ser: los datos necesarios para la aplicación son mayores porque incluyen bocas de tormenta y conductos, el modelo digital de elevación necesita una mayor calidad para representar adecuadamente calles y barreras. Dependiendo la calidad de los datos disponible se requiere un mayor procesamiento de los mismos para poder simular todos los elementos existentes en la cuenca urbana.
- Se logró la aplicación y calibración de un modelo totalmente distribuido en la cuenca del Río Cascavel utilizando en conjunto el modelo TREX que fue utilizado para simular los flujos superficiales y el modelo SWMM utilizado para modelar la red de drenaje y cauces. Debido a lo anterior, se realizó la modificación del código fuente de TREX para que pueda simular el caudal captado por las bocas de tormentas existentes en el sector urbanizado de la cuenca del Río Cascavel.
- A pesar de las deficiencias de la información en los datos de precipitación, secciones transversales de conductos y cauces, ubicación de conductos, modelo de elevación del terreno y determinación de impermeabilidad del suelo en áreas urbana entre otros datos de entrada; el modelamiento hidrológico e hidráulico, permitió reproducir el proceso lluvia-escorrentía y el tránsito hidráulico en los cauces y la red de drenaje pluvial de la cuenca del Río

MODELACIÓN HIDROLÓGICA-HIDRÁULICA TOTALMENTE DISTRIBUIDA DE UNA CUENCA FUERTEMENTE ANTROPIZADA – CASO DEL RÍO CASCAVEL (GUARAPUAVA/PR, BRASIL)

Cascavel. Esto se vio reflejado en los valores obtenidos de las variables de ajuste utilizadas para evaluar la calibración y validación de los distintos eventos seleccionados. Uno de los principales déficit de información al crear el modelo fue información relacionada con la red de drenaje pluvial de la localidad de Guarapuava, al no existir una base de datos de la misma (ni en el Municipio ni en ningún organismo regulador). Por lo tanto se tuvo que realizar un relevamiento a través del Street View y luego verificado parcialmente en el lugar de la ubicación y características de las bocas de tormenta existentes. Como así también se tuvo que aproximar la ubicación y tamaño de la red de conductos pluviales según lo observado en el campo.

- Con el uso en conjunto de TREX y SWMM se pudo obtener valores de niveles y caudales en toda la extensión de la cuenca. En TREX se pudo determinar la altura de escurrimiento en toda la superficie de la cuenca y en SWMM los niveles, caudales y demás parámetros relacionados de todos los cauces y la red de drenaje pluvial de la cuenca del Río Cascavel. De esta forma es posible conocer la respuesta de cada una de los sectores o subcuencas que conforman la cuenca del Río Cascavel según sus características, incluso aquellos sectores que no se encuentran aforados.
- Se observó en la calibración de ambos modelos que los parámetros más sensibles son los relacionados a la transformación lluvia-caudal que se realiza en el modelo TREX, específicamente a los parámetros del modelo de infiltración y de rugosidad del suelo.
- Los modelos utilizados y el procedimiento establecido para la modelación totalmente distribuida en la cuenca del Río Cascavel funcionaron correctamente. Sin embargo, los tiempos computacionales fueron excesivos debido a la resolución adoptada en función del tamaño de la cuenca. Por tal motivo el tiempo computacional utilizado para realizar una simulación de la cuenca completa del Río Cascavel con las resoluciones adoptadas llegó a ser de una semana (168 horas).
- Del anterior punto se concluye que los modelos en conjunto y el procedimiento establecido tiene el potencial de ser utilizado sin inconvenientes en distintas cuencas urbanas ya que contempla todos los elementos que conforman a las mismas. Teniendo en cuenta que presenta la ventaja del uso de información ráster (MDE, mapas de uso de suelo, tipo de suelo, etc.) con lo cual se pueden volcar de manera casi automática (dependiendo la calidad y formato de los datos) al modelo TREX para determinar el escurrimiento superficial, solamente teniendo que realizar de manera manual el trazado de la red de desagües pluvial en SWMM y las bocas de tormentas en TREX.
- Teniendo en cuenta la conclusión anterior, los datos ráster (que son el formato de ingreso de datos del modelo TREX) se consiguen cada vez con mayor facilidad y precisión debido a que son cada vez más alcanzables los relevamientos realizados por drones, imágenes satelitales, información de radar, etc. Siendo de interés entonces la utilización y adecuación de estos tipos de modelos donde se puedan aplicar dicha información de manera directa.

7.1.3.1. Trabajos futuros

- Se podría cumplimentar el trabajo con la aplicación y calibración del modelo con una resolución menor a la adoptada, para poder apreciar si los resultados son buenos utilizando un menor costo computacional y así comprobar las resoluciones óptimas a utilizar sugeridas por el trabajo de [Ichiba \(2016\)](#).
- Al presentarse grandes incertidumbres en los datos de ingreso del modelo sería de gran importancia la generación de datos de mayor calidad para generar un mejor modelo de la cuenca del Río Cascavel. Por ejemplo, sería importante generar el modelo computacional con un MDE de base de mayor calidad, con la red de conductos pluviales reales, con mayor cantidad de datos de precipitación proveniente de pluviógrafos y mediciones de caudal en toda la extensión de la cuenca, con mayor información sobre condiciones iniciales de la cuenca y mayor calidad en general de los datos (confirmación de bocas de tormenta relevadas con Street View, datos de construcciones y sectores impermeables, etc.).
- Incrementar el monitoreo hidrológico en las distintas subcuencas del Río Cascavel para contar con más puntos de evaluación del modelo hidrológico-hidráulico.
- Se debería aumentar la red de estaciones pluviográficas en distintos sectores de la cuenca del Río Cascavel que permita una mejor calidad de los datos tanto espaciales y temporales.
- Los datos obtenidos pueden servir para confirmar la inundabilidad de distintos sectores poblados actualmente y corrigiendo la red de drenaje puede servir si optimizando la misma estos inconvenientes pueden ser solucionados.
- Con el modelo es posible identificar el impacto que tendrá nuevas urbanizaciones en distintos sectores de la cuenca del Río Cascavel.
- Debido a que el procedimiento propuesto para la modelación en conjunto con TRES y SWMM no es totalmente automático, sería conveniente realizar la automatización del modelo para no incurrir en errores ni gasto de tiempo en el pasaje de información del modelo TRES al SWMM. De esta manera se lograría la utilización de un solo software que haría más práctico y amigable su uso.

7.2. Productos del trabajo

Durante la ejecución de este trabajo surgió la posibilidad de asistir a algunos congresos, talleres y simposios y presentar el trabajo en alguno de ellos, la obtención de diferentes becas y la participación en la realización de un curso.

7.2.1. Becas

- En el año 2013, 2014 y 2015 becas Estímulo a las Vocaciones Científicas-CIN, resolución N° 103/2013 de la Comisión Nacional de Ciencia y Arte del Consejo Interuniversitario Nacional “Caracterización experimental y modelación numérica de los procesos de infiltración, intercepción vegetal e impacto por

incendios en cuencas de Córdoba – Fase II” ejecutado en el Laboratorio de Hidráulica del Departamento de Ingeniería Civil, Universidad Tecnológica Nacional, Facultad Regional Córdoba, bajo la dirección del Mg. Ing. Juan F. Weber.

7.2.2. Asistencias a eventos científicos

- 1° Congreso Iberoamericano de Protección, Gestión, Eficiencia, Reciclado y Reúso del Agua. UNC. Córdoba. Mayo de 2013.
- PROIMCA-PRODECA 2013. UTN FRC. Junio de 2013.
- XXIV Congreso Nacional del Agua. San Juan, Argentina. Octubre de 2013.
- Jornadas de Recursos Hídricos. Colegio de Ingenieros Civiles de Córdoba. Córdoba, Abril de 2014.
- 2° Encuentro de investigadores en formación en Recursos Hídricos. Ezeiza, Buenos Aires, Octubre 2014.
- IV Taller Anual Laboratorio de Hidráulica. UTN. FRC. Córdoba. Noviembre 2014.
- II Taller sobre Estudios Hidrológicos en Regiones Áridas y Semiáridas de la República Argentina. Córdoba, Abril 2015.
- Taller sobre Inundaciones en la provincia de Córdoba: Causas, Consecuencias y soluciones. UNVM. Villa María, Córdoba. Mayo de 2015.
- XXV Congreso Nacional del Agua. Paraná, Entre Ríos. 15 al 19 de junio de 2015
- V Taller Anual Laboratorio de Hidráulica. UTN FRC. Córdoba. Diciembre de 2015.
- 3° Encuentro de investigadores en formación en Recursos Hídricos. Ezeiza, Buenos Aires, Octubre 2016.
- VI Taller Anual Laboratorio de Hidráulica. UTN FRC. Córdoba. Diciembre de 2016.
- VI Taller Anual Laboratorio de Hidráulica. UTN FRC. Córdoba. Diciembre de 2017.

7.2.3. Presentaciones

- Weber, J.F., Bupo M., **Stehli, P.T.**, Jorquera, E. **“Líneas estratégicas del Laboratorio de Hidráulica, UTN Fac. Córdoba”**. Jornadas de Recursos Hídricos. Colegio de Ingenieros Civiles de Córdoba. Córdoba, Abril de 2014.
- **Stehli, P.T.**, Weber, J.F., Vestena, L.R. **“Revisión del estado del arte y estrategias de modelación hidrológica distribuida en cuencas urbanas”**. 2° Encuentro de investigadores en formación en Recursos Hídricos. Ezeiza, Buenos Aires, Octubre 2014.
- **Stehli, P.T.** **“Modelación hidrológica distribuida en áreas urbanas”**. IV Taller Anual Laboratorio de Hidráulica. UTN. FRC. Córdoba. Noviembre de 2014.
- **Stehli, P.T.** **“Modelación hidrológica distribuida en áreas urbanas”**. V Taller Anual Laboratorio de Hidráulica. UTN. FRC. Córdoba. Noviembre de 2015.

- **Stehli, P.T., Weber, J.F., Vestena, L.R. “Aplicación de un modelo hidrológico distribuido en una cuenca urbana. Avances”.** 3° Encuentro de investigadores en formación en Recursos Hídricos. Ezeiza, Buenos Aires, Octubre 2016.
- **Stehli, P.T., Weber, J.F., Vestena, L.R. “Avances en la aplicación de un modelo hidrológico distribuido en una cuenca fuertemente antropizada”.** XXVII Congreso Latinoamericano de Hidráulica. Lima, Perú. Septiembre 2016.
- **Stehli, P.T. “Aplicación de un modelo hidrológico distribuido en una cuenca urbana”.** VI Taller Anual Laboratorio de Hidráulica. UTN. FRC. Córdoba. Noviembre de 2016.
- **Stehli, P.T., Weber, J.F., Vestena, L.R. “Aplicación y calibración preliminar de un modelo hidrológico distribuido en una cuenca fuertemente antropizada”.** XXVIII Congreso Latinoamericano de Hidráulica. Buenos Aires, Argentina. Septiembre 2018.

Capítulo 8: Bibliografía

- Abdullah, Jazuri & Muhammad, Nur Shazwani & Muhammad, Siti & Amin, Noor & Tahir, Wardah. (2019). Research trends in hydrological modelling. *Jurnal Teknologi*. 81. 10.11113/jt.v81.13080.
- Ab'Sáber, A. N. (2003). *Os domínios de natureza no Brasil: potencialidades paisagísticas (Vol. 1)* (159 pp.). Ateliê Editorial.
- Ahlman, S. (2006). SEWSYS ett verktyg för att bestämma källor till dagvattenföroreningar och pröva olika åtgärder. *Vatten*, 62(1), 39-48.
- Akbari, A., Samah, A. A., y Othman, F. (2011). Practical use of SRTM digital elevation dataset in the urban-watershed modeling. *Journal of Spatial Hydrology*, 10(2). <http://www.spatialhydrology.net/index.php/JOSH/article/view/93>.
- Allison, INSA-Lyon & Sogreah-consultant. (2005). Manuel d'utilisation de Canoe, www.canoe-hydro.com.
- Amaguchi, H., Kawamura, A., Olsson, J., Takasaki, T (2012). Development and testing of a distributed urban storm runoff event model with a vectorbased catchment delineation. *Journal of Hydrology, Volumes 420–421, Pages 205215*, ISSN 00221694, 10.1016/j.jhydrol.2011.12.003.
- Aparicio, F. (1997). *Fundamentos de hidrología de superficie* (303 pp.). Ed. Limusa, Balderas, México.
- Armitage, N., Fisher-Jeffes, L., Carden, K., Winter, K., Naidoo, V., Spiegel, A., Mauck, B. & Coulson, D. (2014). Water Sensitive Urban Design (WSUD) for South Africa: Framework and Guidelines, WRC Report No. TT 588/14. *Water Research Commission, Pretoria, South Africa*.
- Ayoade, J. O. (1986). *Introdução à climatologia para os trópicos* (332 pp.). Difel, Sao Paulo.
- Barros, C. D. (2012). *Comportamento hidrossedimentológico de uma bacia hidrográfica rural utilizando técnicas de monitoramento e modelagem. 2012. 180 f* (Doctoral dissertation, Dissertação (Mestrado em Ciência do Solo)-Curso de Pós-graduação em Ciência do Solo, Universidade Federal de Santa Maria).
- Bedient, P.B. y Huber, W.C. (1990). *Hydrology and Floodplain Analysis* (816 pp). Addison-Wesley, Reading
- Berthier, E.; Andrieu, H.; Creutin, J.D. (2004). The role of soil in the generation of urban runoff: development and evaluation of a 2D model. *Journal of Hydrology* 299 (3- 4), 252-266.
- Beven, K. J. (2000). Parameter estimation and predictive uncertainty. *Rainfall-Runoff Modeling*, John Wiley and Sons, 225 pp.
- Bhering, S. B., dos Santos, H. G., Bognola, I. A., Cúrcio, G. R., Carvalho Jr, W. D., Chagas, C. D. S., & Silva, J. D. S. (2008). Mapa de solos do Estado do Paraná, legenda atualizada. In *Embrapa Florestas-Artigo em anais de congresso (ALICE)*. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE CIÊNCIA DO SOLO, 32., 2009, Fortaleza. O solo e a produção de bioenergia: perspectivas e desafios: anais. [Viçosa, MG]: SBCS; Fortaleza: UFC, 2009.

- Bigarella, J. J., Becker, R. D., y dos Santos, G. F. (1994). *Estrutura e origem das paisagens tropicais e subtropicais: Fundamentos geológico-geográficos, alteração química e física das rochas*. Ed. da Univ. Federal de Santa Catarina.
- Brazil, L. E., y Krajewski, W. F. (1987). Optimization of complex hydrologic models using random search methods. *In Engineering Hydrology* (pp. 726-731). ASCE.
- Caviglione, J. H., Kiihl, L. R. B., Caramori, P. H., & Oliveira, D. (2000). *Cartas climáticas do Paraná*. Iapar.
- Chapman, T. G. (1970). Optimization of a rainfall-runoff model for an arid zone catchment. *In Symposium on the Results of Research on Representative and Experimental Basins (Wellington, 1970)*, IAHS Publ. no. 96 Vol. 1, 126-144.
- Cheng, C. T., Ou, C. P., & Chau, K. W. (2002). Combining a fuzzy optimal model with a genetic algorithm to solve multi-objective rainfall-runoff model calibration. *Journal of hydrology*, 268(1-4), 72-86.
- Chow, V. T., Maidment, D. R., y Mays, L. W. (1994). *Hidrología aplicada*. McGraw-Hill.
- Courty, L. G., Pedrozo-Acuña, A., y Bates, P. D. (2017). Itzi (versión 17.1): an open-source, distributed GIS model for dynamic flood simulation. *Geoscientific Model Development*, 10(4), 1835-1847.
- Cronshey, R. (1986). *Urban hydrology for small watersheds*. US Dept. of Agriculture, Soil Conservation Service, Engineering Division.
- Davila Ordoñez, M. V. (2012). Modelación distribuida con " Tetis" dentro del marco del proyecto comparación de modelos distribuidos del NWS de EEUU aplicado en la " Región de Oklahoma". Tesis de Maestría. Universidad Politécnica de Valencia.
- Dawdy, D. R., & O'Donnell, T. (1965). Mathematical models of catchment behavior. *Journal of the Hydraulics Division*, 91(4), 123-137.
- Dehotin, J., y Braud, I. (2008). Which spatial discretization for distributed hydrological models? Proposition of a methodology and illustration for medium to large-scale catchments. *Hydrology and Earth System Sciences*, 12(3), 769-796.
- DHI (2017). MIKE URBAN Tutorials. DHI, Hørsholm, Denmark.
- Di Pierro, F., Djordjević, S., Kapelan, Z., Khu, S. T., Savić, D., & Walters, G. A. (2005). Automatic calibration of urban drainage model using a novel multi-objective genetic algorithm. *Water science and technology*, 52(5), 43-52.
- Dias de Oliveira, E. (2011). Impactos da urbanização na geometria hidráulica de canais fluviais da bacia hidrográfica do rio Cascavel, Guarapuava/PR. Dissertação (mestrado) Universidade Estadual do CentroOeste, Programa de PósGraduação em Geografia. Orientador: Leandro Redin Vestena.
- Du, J., Xie, S., Xu, Y., Xu, C. Y., & Singh, V. P. (2007). Development and testing of a simple physically-based distributed rainfall-runoff model for storm runoff simulation in humid forested basins. *Journal of Hydrology*, 336(3-4), 334-346.
- Eaton, J. W., Bateman, D., y Hauberg, S. (1997). *Gnu octave*. London: Network theory.
- Elliott, A. H., & Trowsdale, S. A. (2007). A review of models for low impact urban stormwater drainage. *Environmental modelling & software*, 22(3), 394-405.

MODELACIÓN HIDROLÓGICA-HIDRÁULICA TOTALMENTE DISTRIBUIDA DE UNA CUENCA FUERTEMENTE ANTROPIZADA – CASO DEL RÍO CASCAVEL (GUARAPUAVA/PR, BRASIL)

- England, J.F. Jr. (2006). *Frequency Analysis and Two-Dimensional Simulations of Extreme Floods on a Large Watershed*. Ph.D. dissertation, Department of Civil Engineering, Colorado State University, Fort Collins, Colorado. 237 p.
- England, J., Velleux, M. y Julien, P. (2007). Two dimensional simulations of extreme floods on a large watershed. *Journal of Hydrology*, 347(1):229241.
- Engman, E. T. (1986). Roughness coefficients for routing surface runoff. *Journal of Irrigation and Drainage Engineering*, 112(1), 39-53.
- Freni, G, Maglionico, M., Federico Di V. (2003). *Estado del arte en la modelación de drenaje urbano*. CARE-S Report D7. .
- Giangola-Murzyn, (2013). *Modelación y parametrización hidrológica de la ciudad, resistencia a inundaciones*. Tesis de Doctorado. Université Paris-Est
- Gomes, E. S. (2014). A dinâmica hidrológica fluvial em bacias hidrográficas com diferentes taxas de impermeabilização do solo em Guarapuava/PR. Dissertação (Mestrado em Geografia) – Universidade Estadual do Centro-Oeste, Guarapuava.
- Gomes, E. de S. y Vestena, L. R. (2018). A Expansão da Mancha Urbana da Cidade de Guarapuava-PR, entre 1940 e 2016. *Geografia (Londrina)*, 27 (2): 163 – 183, abril/2018.
- Gupta, V. K., y Sorooshian, S. (1985). The automatic calibration of conceptual catchment models using derivative-based optimization algorithms. *Water Resources Research*, 21(4), 473-485.
- Gupta, H. V., Bastidas, L. A., Sorooshian, S., Shuttleworth, W. J., y Yang, Z. L. (1999). Parameter estimation of a land surface scheme using multicriteria methods. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 104(D16), 19491-19503.
- HDR-HydroQual, (2011). *T-REX Watershed Modeling Framework User's Manual: Model Theory and Description*. Inc., Colorado State University, Bureau of Reclamation, 2011.
- Healy, R. W., 1990, Simulation of solute transport in variably saturated porous media with supplemental information on modifications to the U.S. Geological Survey's Computer Program VS2D, U.S. *Geological Survey Water Resources Investigations Report 90-4025*, 125 p.
- Hendrickson, J. D., Sorooshian, S., y Brazil, L. E. (1988). Comparison of Newton-type and direct search algorithms for calibration of conceptual rainfall-runoff models. *Water Resources Research*, 24(5), 691-700.
- IAPAR (2011). Instituto Agrônomico do Paraná. *Médias históricas em estações do IAPAR. Estação: Guarapuava.* Disponível em: <http://www.iapar.br/arquivos/Image/monitoramento/Medias_Historicas/Guarapuava.htm>. Acesso em: 28 de dez. de 2010.
- IBGE (2011). Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística. Sistema IBGE de Recuperação Automática - SIDRA. Disponível em:<<http://www.sidra.ibge.gov.br>> Acesso em: 25 de jul. 2011.
- IBGE (2018). Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística. Cidades. Disponível em: <<https://cidades.ibge.gov.br/brasil/pr/guarapuava/panorama>>. Acesso em: 04 out. 2018.
- Ichiba, A. (2016). *X-band radar data and predictive management in urban hydrology* (Doctoral dissertation, Université Paris-Est).

- Ichiba, A., Gires, A., Tchiguirinskaia, I., Schertzer, D., Bompard, P., y Ten Veldhui, M. C. (2018). Scale effect challenges in urban hydrology highlighted with a distributed hydrological model. *Hydrology & Earth System Sciences*, 22(1).
- INSA-Valor, S. O. G. R. E. A. H. (1999). Canoe: logiciel d'hydrologie urbaine, conception et évaluation de réseaux d'assainissement, simulation des pluies, des écoulements et de la qualité des eaux. *Manuel de l'utilisateur*.
- Jeon, J. H., Park, C. G., & Engel, B. A. (2014). Comparison of performance between genetic algorithm and SCE-UA for calibration of SCS-CN surface runoff simulation. *Water*, 6(11), 3433-3456.
- Johnston, P. R., y Pilgrim, D. H. (1976). Parameter optimization for watershed models. *Water Resources Research*, 12(3), 477-486.
- Jorquera E., Weber J.F., y Reyna S.M. (2012). Revisión del estado del arte en la modelación hidrológica distribuida e integrada. *Primer Encuentro de investigadores en formación en Recursos Hídricos*. Ezeiza, Bs. As.
- Kalyanapu, A. J., Burian, S. J., & McPherson, T. N. (2010). Effect of land use-based surface roughness on hydrologic model output. *Journal of Spatial Hydrology*, 9(2).
- Kilinc, M. y Richardson, E. V. (1973) Mechanics of soil erosion from overland flow generated by simulated rainfall. *Hydrology Paper no. 63, Colorado State University*. Fort Collins, Colorado, USA.
- Kleidorfer, M., Deletic, A., Fletcher, T. D., y Rauch, W. (2009). Impact of input data uncertainties on urban stormwater model parameters. *Water Science and Technology*, 60(6), 1545-1554.
- Lidén, R., y Harlin, J. (2000). Analysis of conceptual rainfall-runoff modelling performance in different climates. *Journal of hydrology*, 238(3-4), 231-247.
- Lind, J. (2015). *Stormwater modelling tools: a comparison and evaluation*. Tesis de Doctorado. Universidad de Uppsala, Suecia.
- Linsley, R. K., Kohler, M. A., y Paulhus, J. L. (1977). *Hidrología para ingenieros* (No. GB661 L5e 1977).
- Llamas, J. (1989). Hidrología general; principios y aplicaciones. *In Hidrología general; principios y aplicaciones*. Universidad Autónoma del Estado de México.
- Lloyd, S., Wong, T., & Chesterfield, C., (2002). *Water Sensitive Urban Design – A stormwater management perspective*. Cooperative Research Centre for Catchment Hydrology.
- Loboda, C. R. (2008). *Práticas socioespaciais e espaços públicos em Guarapuava-PR*.
- Maack, R. (1981). *Geografía física do Estado do Paraná*. J. Olympio.
- Madsen, H. (2000). Automatic calibration of a conceptual rainfall-runoff model using multiple objectives. *Journal of hydrology*, 235(3-4), 276-288.
- Mays, L. W. (2004). *Stormwater collection systems design handbook*. McGraw-Hill Professional.
- McCuen, R. H. (1989). *Hydrologic analysis and design* (pp. 143-147). Englewood Cliffs, NJ: Prentice-Hall.

MODELACIÓN HIDROLÓGICA-HIDRÁULICA TOTALMENTE DISTRIBUIDA DE UNA CUENCA FUERTEMENTE ANTROPIZADA – CASO DEL RÍO CASCAVEL (GUARAPUAVA/PR, BRASIL)

- MINEROPAR. MINERAIS DO PARANÁ S/A. (1992). *Geologia de planejamento: Caracterização do Meio Físico da Área Urbana de Guarapuava*. MINEROPAR: Curitiba.
- MINEROPAR. MINERAIS DO PARANÁ S/A. (2001). *Atlas geológico do Estado do Paraná*. MINEROPAR: Curitiba.
- Mitchell, V. G., Duncan, H., Inman, M., Rahilly, M., Stewart, J., Vieritz, A., Holt, P., Grant, A., Fletcher, T., Coleman, J., Maheepala, S., Sharma, A., Deletic, A. and Breen, P. (2007), Integrated Urban Water Modelling - Past, Present, and Future, Joint 13th International Rainwater Catchment Systems Conference and the 5th International Water Sensitive Urban Design Conference, Conference 21-23 August, 2007, Sydney, Australia.
- Mobayed K., N. (2009). Simulador de inundaciones en áreas urbanas: Un modelo de pronóstico con fines de alertamiento. *CIENCI@UAQ*. 2: 72-90.
- Mobayed K., N. y C. Cruickshank V. (1998). Ordenamiento sistemático de redes de drenaje para la modelación físico-hidrológica. In: *XVIII Congreso Latinoamericano de Hidráulica*. Oaxaca, México. pp: 611-620.
- Mobayed K., N., y F. Ortiz A. (2000). Modelo integral simplificado de las ecuaciones de Saint-Venant para el tránsito de avenidas. In: *XIX Congreso Latinoamericano de Hidráulica*. Córdoba, Argentina. 8 p.
- Monro, J. C. (1971). Direct search optimization in mathematical modeling and a watershed model application. NOAA Tech. Memo. NWS Hydro-12.
- Nash, J. E. (1970). River flow forecasting through conceptual models, I: A discussion of principles. *Journal of Hydrology*, 10, 398-409.
- Neteler, M. y Mitasova, H. (2008). *Open Source GIS: A GRASS GIS Approach*, volumen 773 de The International Series in Engineering and Computer Science. Springer, New York, 2 edición.
- Ochoa-Rodriguez, S., Wang, L-P., Assel J.V., Gires A., Ichiba A., Bruni G and ten Veldhuis M-C. (2013). *Urban Pluvial Flood Modeling: Current Theory and Practice*. Paris: RainGain. http://www.raingain.eu/sites/default/files/wp3_review_document.pdf.
- Ochoa-Rodriguez, S., Wang, L-P., Gires, A., Pina, R.D., Reinoso-Rondinel, R., Bruni, G., Ichiba, A., Gaitan, S., Cristiano, E., Assel, J.v., Kroll, S., Murlà-Tuyls, D., Tisserand, B., Schertzer, D., Tchiguirinskaia, I., Onof, C., Willems, P., ten Veldhuis, M-C., (2015). Impact of spatial and temporal resolution of rainfall inputs on urban hydrodynamic modelling outputs: A multi-catchment investigation. *Journal of Hydrology*, 531, 389-407.
- Ojeda, M., y Nicolas, J. (2011). Modelación hidrológica distribuida en ámbitos residenciales de viviendas unifamiliares. Tesina presentada como requisito parcial para optar al título de Máster en Ingeniería Hidráulica y Medio Ambiente. Universidad Politécnica de Valencia.
- Oliveira, E.D. (2011). *Impactos da urbanização na geometria hidráulica de canais fluviais da bacia hidrográfica do Rio Cascavel, Guarapuava-PR*. Dissertação (Mestrado em Geografia) Universidade Estadual do Centro-Oeste, Guarapuava.
- Orsolini, H. E., Zimmermann, E. D., y Basile, P. A. (2000). Hidrología: procesos y métodos. In *Hidrología: procesos y métodos*. Universidad Nacional de Rosario.

- Palacios, V. OL (1986). El uso de modelos en irrigación y áreas afines. *Terra*, 4, 41-49.
- Pan, A., Hou, A., Tian, F., Ni, G. y Hu, H. (2012). Hydrologically Enhanced Distributed Urban Drainage Model and Its Application in Beijing City. *Journal of Hydrologic Engineering ASCE*. Vol. 17 Issue 6, p667-678.
- Park, S. Y., Lee, K. W., Park, I. H., y Ha, S. R. (2008). Effect of the aggregation level of surface runoff fields and sewer network for a SWMM simulation. *Desalination*, 226(1-3), 328-337.
- Pedraza, R. A., Gómez Valentín, M., & Reyna, S. (2006). Efectos de escala sobre la simulación del flujo de agua superficial en cuencas urbanas usando modelos basados en la onda cinemática. *Ingeniería del Agua*, 2006, vol. 13, núm. 2.
- Pickup, G. (1977). Testing of efficiencies of algorithms and strategies for automatic calibración of rainfall-runoff models. *Hydrogeol. Sci. Bull.* 22: 257 - 274.
- Pina, R., Ochoa-Rodríguez, S., Simões, N., Mijic, A., Marques, A., & Maksimović, Č. (2016). Semi-vs. fully-distributed urban stormwater models: model set up and comparison with two real case studies. *water*, 8(2), 58.
- Puricelli, M. M. (2003). *Estimación y distribución de parámetros del suelo para la modelación hidrológica*. Universidad Politécnica de Valencia, Departamento de Ingeniería Hidráulica y Medio Ambiente. Tesis Doctoral.
- Rangari, V. A., Patel, A. K., & Umamahesh, N. V. (2015). Review of urban stormwater models. *HYDRO 2015, 20th Int. Conf. On Hydraulics*, IIT Roorkee, India.
- Rapacioli, R. (2007). La problemática aluvional en el desarrollo urbano de la región del Alto Valle del Río Negro. *Neuquén. Argentina*.
- Rawls, W. J., Brakensiek, D. L., y Saxton, K. E. (1982). Estimation of soil water properties. *Transactions of the ASAE*, 25(5), 1316-1320.
- Riccardi, G. A. (1997). La transformación lluvia-caudal en ambientes rurales y urbanos. Los procesos hidrológicos y el modelado. *Cuadernos del CURIHAM*, 4, 69-87.
- Riccardi, G. (2004). Hidrología en medios antropizados. *Rosario. UNR*.
- Ripollès, J. D., y Gómez, M. (1994). Problemática del drenaje de aguas pluviales en zonas urbanas y del estudio hidráulico de las redes de colectores. *Ingeniería del agua*, 1(1).
- Rodriguez, F., Andrieu, H., Morena, F. (2008). A distributed hydrological model for urbanized areas – Model development and application to case studies. *Journal of Hydrology, Volume 351, Issues 3-4, 268287, ISSN 00221694, 10.1016/j.jhydrol.2007.12.007*.
- Rossman, L. A. (2010). *Storm water management model user's manual, version 5.0* (p. 276). Cincinnati: National Risk Management Research Laboratory, Office of Research and Development, US Environmental Protection Agency.
- Rossman, L. A. (2015). *Storm water management model. Reference manual*. Cincinnati: National Risk Management Research Laboratory, Office of Research and Development, US Environmental Protection Agency.

MODELACIÓN HIDROLÓGICA-HIDRÁULICA TOTALMENTE DISTRIBUIDA DE UNA CUENCA FUERTEMENTE ANTROPIZADA – CASO DEL RÍO CASCAVEL (GUARAPUAVA/PR, BRASIL)

- Salvadore, E., Bronders, J., y Batelaan, O. (2015). Hydrological modelling of urbanized catchments: A review and future directions. *Journal of hydrology*, 529, 62-81
- Singh, P. V. (1996). *Computer models of watershed hydrology*. Water Resources Publications.
- Sitterson, J., Chris Knightes, R. Parmar, K. Wolfe, M. Muche, y B. Avant (2017). *An Overview of Rainfall-Runoff Model Types*. U.S. Environmental Protection Agency, Washington, DC, EPA/600/R-17/482.
- Solomatine, D. P., (2001). Experience with nine automatic calibration algorithms: Global optimization with GLOBE system. Disponible en Internet: <<http://www.dhi.dk/softcon/papers/003/003.htm>>.
- Sorooshian, S. (1981). Parameter estimation of rainfall-runoff models with heteroscedastic streamflow errors—The noninformative data case. *Journal of Hydrology*, 52(1-2), 127-138.
- Sorooshian, S., Duan, Q., y Gupta, V. K. (1993). Calibration of rainfall-runoff models: Application of global optimization to the Sacramento soil moisture accounting model. *Water resources research*, 29(4), 1185-1194.
- Sorooshian, S., Gupta, V. K., y Fulton, J. L. (1983). Evaluation of maximum likelihood parameter estimation techniques for conceptual rainfall-runoff models: Influence of calibration data variability and length on model credibility. *Water Resources Research*, 19(1), 251-259
- Stehli, P. T. (2013). *Modelación matemática distribuida del impacto hidrológico ambiental de los incendios en la zona serrana de la provincia de Córdoba*. Trabajo final de Ingeniería Civil, UTN, FRC. Tutor: Weber, Juan F.
- Stephenson, D. (1989). Selection of Stormwater Model Parameters, *Journal of Environmental Engineering*, 115, 210–220.
- Suguio, K., y Bigarella, J. J. (1990). *Ambientes fluviais*. Universidade Federal de Santa Catarina.
- Tucci, C. E. (1998). *Modelos hidrológicos*. UFRGS.
- Vélez, J. J. (2003). Desarrollo de un modelo distribuido de predicción en tiempo real para eventos de crecidas. *Departamento de Ingeniería Hidráulica y Medio Ambiente. ETS de Ingenieros de Caminos, Canales y Puertos. Valencia, Universidad Politécnica De Valencia. Doctorado*
- Velleux, M., England, J. y Julien, P. (2008). TREX: Spatially Distributed Model to Assess Watershed Contaminant Transport and Fate. *Science of the Total Environment*, 404(1):113-128.
- Velleux, M.L. (2005). *Spatially distributed model to assess watershed contaminant transport and fate*. Ph.D. dissertation, Department of Civil Engineering, Colorado State University, Fort Collins, Colorado.
- Vieux, B. E. (2004). *Distributed hydrologic modeling using GIS*, volumen 48. Water Science and Technology Library.
- Weber, J. F., Stehli, P. T., Jorquera, E. (2012). Simulación de la respuesta hidrológica de una cuenca ante el movimiento de una tormenta. *Mecánica Computacional, Vol. XXXI No. 4*, pp. 579603. Asociación Argentina de Mecánica Computacional, Salta. ISSN: 16666070.

- Yapo, P. O., Gupta, H. V., y Sorooshian, S. (1998). Multi-objective global optimization for hydrologic models. *Journal of hydrology*, 204(1-4), 83-97.
- Zektser, I. S., y Loaiciga, H. A. (1993). Groundwater fluxes in the global hydrologic cycle: past, present and future. *Journal of Hydrology*, 144(1-4), 405-427.

Anexo I – Modificación del código fuente de TREX. Módulo infiltración

```
if(isoil == 1)
{
Alt1=9999;
Alt2=9999;
Alt3=9999;
Alt4=9999;
Caudal_Pablo1=0;
Caudal_Pablo2=0;
Caudal_Pablo3=0;
Caudal_Pablo4=0;
    if(imask[i+1][j] != nodatavalue)
    {
        if(elevationov[(i+1)][j]<elevationov[i][j])
        {
            Alt1=elevationov[(i+1)][j];
        }
    }
    if(imask[i-1][j] != nodatavalue)
    {
        if(elevationov[(i-1)][j]<elevationov[i][j])
        {
            Alt2=(float)elevationov[(i-1)][j];
        }
    }
    if(imask[i][j+1] != nodatavalue)
    {
        if(elevationov[i][j+1]<elevationov[i][j])
        {
            Alt3=(float)elevationov[i][j+1];
        }
    }
    if(imask[i][j-1] != nodatavalue)
    {
        if(elevationov[i][j-1]<elevationov[i][j])
        {
            Alt4=(float)elevationov[i][j-1];
        }
    }
    if(elevationov[i][j]<= Alt1 && elevationov[i][j]<= Alt2 &&
elevationov[i][j]<= Alt3 && elevationov[i][j]<= Alt4)
    {
        hcell = hov[i][j];
        hcordon=(float)(-50.15*pow(hcell,4)+42.13*pow(hcell,3)-
12.907*pow(hcell,2)+2.3993*hcell);
        if (hcordon <= 0.225)
        {
            infiltrationrate[i][j]=(float)(1.656*khsoil[isoil]*pow(hcordon,1.5)*0.04);
        }
        else
        {
            infiltrationrate[i][j]=(float)(0.67*khsoil[isoil]*0.15*pow((2*9.81*(hcordo
n-0.15/2)),0.5)*0.05*0.04);
        }
    }
else
```

```

{
if(imask[i+1][j] != nodatavalue)
{
    if(elevationov[i+1][j] > elevationov[i][j] )
    {
        so = (elevationov[i+1][j]-elevationov[i][j])/w;
        hcell = hov[i+1][j];
        dxdh = (hov[i][j]-hcell)/w;
        sf = so - dxdh;
        ncell = (float)0.013;//nmanningov[landuse[i+1][j]];
        alpha = (float)(pow(fabs(sf),0.5) / ncell);
        Caudal_Pablo1 = (float)(w * (alpha* pow((hcell),1.667)));
    }
}
if(imask[i-1][j] != nodatavalue)
{
    if(elevationov[i-1][j] > elevationov[i][j] )
    {
        so = (elevationov[i-1][j]-elevationov[i][j])/w;
        hcell = hov[i-1][j];
        dxdh = (hov[i][j]-hcell)/w;
        sf = so - dxdh;
        ncell = (float)0.013;//nmanningov[landuse[i-1][j]];
        alpha = (float)(pow(fabs(sf),0.5) / ncell);
        Caudal_Pablo2 = (float)(w * (alpha* pow((hcell),1.667)));
    }
}
if(imask[i][j+1] != nodatavalue)
{
    if(elevationov[i][j+1] > elevationov[i][j] )
    {
        so = (elevationov[i][j+1]-elevationov[i][j])/w;
        hcell = hov[i][j+1];
        dxdh = (hov[i][j]-hcell)/w;
        sf = so - dxdh;
        ncell = (float)0.013;//nmanningov[landuse[i][j+1]];
        alpha = (float)(pow(fabs(sf),0.5) / ncell);
        Caudal_Pablo3 = (float)(w * (alpha* pow((hcell),1.667)));
    }
}
if(imask[i][j-1] != nodatavalue)
{
    if(elevationov[i][j-1] > elevationov[i][j] )
    {
        so = (elevationov[i][j-1]-elevationov[i][j])/w;
        hcell = hov[i][j-1];
        dxdh = (hov[i][j]-hcell)/w;
        sf = so - dxdh;
        ncell = (float)0.013;//nmanningov[landuse[i][j-1]];
        alpha = (float)(pow(fabs(sf),0.5) / ncell);
        Caudal_Pablo4 = (float)(w * (alpha* pow((hcell),1.667)));
    }
}
if(imask[i-1][j] != nodatavalue)
{
    if ((elevationov[i-1][j] < elevationov[i][j]) &&
(elevationov[i-1][j] < elevationov[i+1][j]) && (elevationov[i-1][j] <
elevationov[i][j-1]) && (elevationov[i-1][j] < elevationov[i][j+1]))

```

**MODELACIÓN HIDROLÓGICA-HIDRÁULICA TOTALMENTE DISTRIBUIDA DE UNA CUENCA
FUERTEMENTE ANTROPIZADA – CASO DEL RÍO CASCAVEL (GUARAPUAVA/PR, BRASIL)**

```

        {
            so=abs((elevationov[i][j]-elevationov[i-1][j])/w);
        }
    }
    if(imask[i+1][j] != nodatavalue)
    {
        if ((elevationov[i+1][j] < elevationov[i][j])    &&
(elevationov[i+1][j] < elevationov[i-1][j])    &&    (elevationov[i+1][j] <
elevationov[i][j-1]) && (elevationov[i+1][j] < elevationov[i][j+1]))
        {
            so=abs((elevationov[i][j]-elevationov[i+1][j])/w);
        }
    }
    if(imask[i][j+1] != nodatavalue)
    {
        if ((elevationov[i][j+1] < elevationov[i][j])    &&
(elevationov[i][j+1] < elevationov[i+1][j])    &&    (elevationov[i][j+1] <
elevationov[i-1][j]) && (elevationov[i][j+1] < elevationov[i][j-1]))
        {
            so=abs((elevationov[i][j]-elevationov[i][j+1])/w);
        }
    }
    if(imask[i][j-1] != nodatavalue)
    {
        if ((elevationov[i][j-1] < elevationov[i][j])    &&
(elevationov[i][j-1] < elevationov[i+1][j])    &&    (elevationov[i][j-1] <
elevationov[i-1][j]) && (elevationov[i][j-1] < elevationov[i][j+1]))
        {
            so=abs((elevationov[i][j]-elevationov[i][j-1])/w);
        }
    }
    Caudal_Pablo = (float)(Caudal_Pablo1+Caudal_Pablo2+Caudal_Pablo3+Caudal_Pablo4);
    Lttotal=(float)(0.817*pow(Caudal_Pablo,0.42)*pow(so,0.30)*pow(0.0004, -0.6));
    if (Lttotal<=khsoil[isoil])
    {
        PorcentajePasante=0.0;
        PorcentajeInsumido=1.0;
    }
    else
    {
        PorcentajePasante = (float)(pow((1-khsoil[isoil]/Lttotal),1.8));
        PorcentajeInsumido=(float)(1-PorcentajePasante);
    }
    infiltrationrate[i][j]=(float)(Caudal_Pablo*PorcentajeInsumido*0.04);
}
else if(isoil == 2)
{
    Alt1=9999;
    Alt2=9999;
    Alt3=9999;
    Alt4=9999;
    Caudal_Pablo1=0;
    Caudal_Pablo2=0;
    Caudal_Pablo3=0;
    Caudal_Pablo4=0;
    if(imask[i+1][j] != nodatavalue)
    {
        if(elevationov[(i+1)][j]<elevationov[i][j])
        {

```

```

        Alt1=elevationov[(i+1)][j];
    }
}
if(imask[i-1][j] != nodatavalue)
{
    if(elevationov[(i-1)][j]<elevationov[i][j])
    {
        Alt2=(float)elevationov[(i-1)][j];
    }
}
if(imask[i][j+1] != nodatavalue)
{
    if(elevationov[i][j+1]<elevationov[i][j])
    {
        Alt3=(float)elevationov[i][j+1];
    }
}
if(imask[i][j-1] != nodatavalue)
{
    if(elevationov[i][j-1]<elevationov[i][j])
    {
        Alt4=(float)elevationov[i][j-1];
    }
}
if(elevationov[i][j]<= Alt1 && elevationov[i][j]<= Alt2 &&
elevationov[i][j]<= Alt3 && elevationov[i][j]<= Alt4)
{
    hcell = hov[i][j];
    hcordon=(float)(-50.15*pow(hcell,4)+42.13*pow(hcell,3)-
12.907*pow(hcell,2)+2.3993*hcell);
    if (hcordon <= 0.225)
    {
        infiltrationrate[i][j]=(float)(1.656*khsoil[isoil]*pow(hcordon,1.5)*0.04);
    }
    else
    {
        infiltrationrate[i][j]=(float)(0.67*khsoil[isoil]*0.15*pow((2*9.81*(hcordon-
0.15/2)),0.5)*0.05*0.04);
    }
}
else
{
    if(imask[i+1][j] != nodatavalue)
    {
        if(elevationov[i+1][j] > elevationov[i][j] )
        {
            so = (elevationov[i+1][j]-elevationov[i][j])/w;
            hcell = hov[i+1][j];
            dxdh = (hov[i][j]-hcell)/w;
            sf = so - dxdh;
            ncell = (float)0.013;//nmanningov[landuse[i+1][j]];
            alpha = (float)(pow(fabs(sf),0.5) / ncell);
            Caudal_Pablo1 = (float)(w * (alpha* pow((hcell),1.667)));
        }
    }
    if(imask[i-1][j] != nodatavalue)
    {
        if(elevationov[i-1][j] > elevationov[i][j] )

```

MODELACIÓN HIDROLÓGICA-HIDRÁULICA TOTALMENTE DISTRIBUIDA DE UNA CUENCA FUERTEMENTE ANTROPIZADA – CASO DEL RÍO CASCAVEL (GUARAPUAVA/PR, BRASIL)

```
{
    so = (elevationov[i-1][j]-elevationov[i][j])/w;
    hcell = hov[i-1][j];
    dxdh = (hov[i][j]-hcell)/w;
    sf = so - dxdh;
    ncell = (float)0.013;//nmanningov[landuse[i-1][j]];
    alpha = (float)(pow(fabs(sf),0.5) / ncell);
    Caudal_Pablo2 = (float)(w * (alpha* pow((hcell),1.667)));
}
}
if(imask[i][j+1] != nodatavalue)
{
    if(elevationov[i][j+1] > elevationov[i][j] )
    {
        so = (elevationov[i][j+1]-elevationov[i][j])/w;
        hcell = hov[i][j+1];
        dxdh = (hov[i][j]-hcell)/w;
        sf = so - dxdh;
        ncell = (float)0.013;//nmanningov[landuse[i][j+1]];
        alpha = (float)(pow(fabs(sf),0.5) / ncell);
        Caudal_Pablo3 = (float)(w * (alpha* pow((hcell),1.667)));
    }
}
if(imask[i][j-1] != nodatavalue)
{
    if(elevationov[i][j-1] > elevationov[i][j] )
    {
        so = (elevationov[i][j-1]-elevationov[i][j])/w;
        hcell = hov[i][j-1];
        dxdh = (hov[i][j]-hcell)/w;
        sf = so - dxdh;
        ncell = (float)0.013;//nmanningov[landuse[i][j-1]];
        alpha = (float)(pow(fabs(sf),0.5) / ncell);
        Caudal_Pablo4 = (float)(w * (alpha* pow((hcell),1.667)));
    }
}
if(imask[i-1][j] != nodatavalue)
{
    if ((elevationov[i-1][j] < elevationov[i][j]) &&
(elevationov[i-1][j] < elevationov[i+1][j]) && (elevationov[i-1][j] <
elevationov[i][j-1]) && (elevationov[i-1][j] < elevationov[i][j+1]))
    {
        so=(elevationov[i][j]-elevationov[i-1][j])/w;
    }
}
if(imask[i+1][j] != nodatavalue)
{
    if ((elevationov[i+1][j] < elevationov[i][j]) &&
(elevationov[i+1][j] < elevationov[i-1][j]) && (elevationov[i+1][j] <
elevationov[i][j-1]) && (elevationov[i+1][j] < elevationov[i][j+1]))
    {
        so=(elevationov[i][j]-elevationov[i+1][j])/w;
    }
}
if(imask[i][j+1] != nodatavalue)
{
    if ((elevationov[i][j+1] < elevationov[i][j]) &&
(elevationov[i][j+1] < elevationov[i+1][j]) && (elevationov[i][j+1] <
elevationov[i-1][j]) && (elevationov[i][j+1] < elevationov[i][j-1]))
    {
```

```

        so=(elevationov[i][j]-elevationov[i][j+1])/w;
    }
    }
    if(imask[i][j-1] != nodatavalue)
    {
        if ((elevationov[i][j-1] < elevationov[i][j]) &&
(elevationov[i][j-1] < elevationov[i+1][j]) && (elevationov[i][j-1] <
elevationov[i-1][j])) && (elevationov[i][j-1] < elevationov[i][j+1]))
        {
            so=(elevationov[i][j]-elevationov[i][j-1])/w;
        }
    }
}
Caudal_Pablo=(float)(Caudal_Pablo1+Caudal_Pablo2+Caudal_Pablo3+Caudal_Pablo4);
Ltotal=(float)(0.817*pow(Caudal_Pablo,0.42)*pow(so,0.30)*pow(0.0004, -0.6));
if (Ltotal<=khsoil[isoil])
{
    PorcentajePasante=0.0;
    PorcentajeInsumido=1.0;
}
else
{
    PorcentajePasante =(float)(pow((1-khsoil[isoil]/Ltotal),1.8));
    PorcentajeInsumido=(float)(1-PorcentajePasante);
}
infiltrationrate[i][j]=(float)(Caudal_Pablo*PorcentajeInsumido*0.04);
}
}
else if(isoil == 3)
{
    Alt1=9999;
    Alt2=9999;
    Alt3=9999;
    Alt4=9999;
    if(imask[i+1][j] != nodatavalue)
    {
        if(elevationov[(i+1)][j]<elevationov[i][j])
        {
            Alt1=elevationov[(i+1)][j];
        }
    }
    if(imask[i-1][j] != nodatavalue)
    {
        if(elevationov[(i-1)][j]<elevationov[i][j])
        {
            Alt2=elevationov[(i-1)][j];
        }
    }
    if(imask[i][j+1] != nodatavalue)
    {
        if(elevationov[i][j+1]<elevationov[i][j])
        {
            Alt3=elevationov[i][j+1];
        }
    }
    if(imask[i][j-1] != nodatavalue)
    {
        if(elevationov[i][j-1]<elevationov[i][j])

```

**MODELACIÓN HIDROLÓGICA-HIDRÁULICA TOTALMENTE DISTRIBUIDA DE UNA CUENCA
FUERTEMENTE ANTROPIZADA – CASO DEL RÍO CASCAVEL (GUARAPUAVA/PR, BRASIL)**

```

        {
            Alt4=elevationov[i][j-1];
        }
    }
    if(elevationov[i][j]<= Alt1 && elevationov[i][j]<= Alt2 &&
elevationov[i][j]<= Alt3 && elevationov[i][j]<= Alt4)
    {
        hcell = hov[i][j];
        hcordon=(float)(-50.15*pow(hcell,4)+42.13*pow(hcell,3)-
12.907*pow(hcell,2)+2.3993*hcell);
        if (hcordon <= (1.792*khsoil[isoil]/capshsoil[isoil]))
        {
            infiltrationrate[i][j]=(float)(1.656*capshsoil[isoil]*pow(hcordon,1.5)*0.0
4);
        }
        else
        {
            infiltrationrate[i][j]=(float)(2.91*capshsoil[isoil]*pow(hcordon,0.5)*0.04
);
        }
    }
    else
    {
        if(Alt1<=Alt2 && Alt1<=Alt3 && Alt1<=Alt4 && Alt1<=
elevationov[i][j])
        {
            so = (elevationov[i][j]-Alt1)/w;
        }
        else if(Alt2<=Alt1 && Alt2<=Alt3 && Alt2<=Alt4 && Alt2<=
elevationov[i][j])
        {
            so = (elevationov[i][j]-Alt2)/w;
        }
        else if(Alt3<=Alt1 && Alt3<=Alt2 && Alt3<=Alt4 && Alt3<=
elevationov[i][j])
        {
            so = (elevationov[i][j]-Alt3)/w;
        }
        else
        {
            so = (elevationov[i][j]-Alt4)/w;
        }
        hcell = hov[i][j];
        hcordon=(float)(-50.15*pow(hcell,4)+42.13*pow(hcell,3)-
12.907*pow(hcell,2)+2.3993*hcell);
        infiltrationrate[i][j]=(float)(0.205*(-
4552.6*pow(so,2)+658*so+11.784)*pow(hcordon,1.667)*0.04);
        if(infiltrationrate[i][j]<=0)
        {
            infiltrationrate[i][j]=0;
        }
    }
}
else if(isoil == 4)
{
    Alt1=9999;
    Alt2=9999;
    Alt3=9999;
    Alt4=9999;
    if(imask[i+1][j] != nodatavalue)

```

```

{
    if(elevationov[(i+1)][j]<elevationov[i][j])
    {
        Alt1=elevationov[(i+1)][j];
    }
}
if(imask[i-1][j] != nodatavalue)
{
    if(elevationov[(i-1)][j]<elevationov[i][j])
    {
        Alt2=elevationov[(i-1)][j];
    }
}
if(imask[i][j+1] != nodatavalue)
{
    if(elevationov[i][j+1]<elevationov[i][j])
    {
        Alt3=elevationov[i][j+1];
    }
}
if(imask[i][j-1] != nodatavalue)
{
    if(elevationov[i][j-1]<elevationov[i][j])
    {
        Alt4=elevationov[i][j-1];
    }
}
if(elevationov[i][j]<= Alt1 && elevationov[i][j]<= Alt2 &&
elevationov[i][j]<= Alt3 && elevationov[i][j]<= Alt4)
{
    hcell = hov[i][j];
    hcordon=(float)(-50.15*pow(hcell,4)+42.13*pow(hcell,3)-
12.907*pow(hcell,2)+2.3993*hcell);
    if (hcordon <= (1.792*khsoil[isoil]/capshsoil[isoil]))
    {
        infiltrationrate[i][j]=(float)(1.656*capshsoil[isoil]*pow(hcordon,1.5)*0.0
4);
    }
    else
    {
        infiltrationrate[i][j]=(float)(2.91*capshsoil[isoil]*pow(hcordon,0.5)*0.04
);
    }
    if(infiltrationrate[i][j]<=0)
    {
        infiltrationrate[i][j]=0;
    }
}
else
{
    if(Alt1<=Alt2 && Alt1<=Alt3 && Alt1<=Alt4)
    {
        so = (elevationov[i][j]-Alt1)/w;
    }
    else if(Alt2<=Alt1 && Alt2<=Alt3 && Alt2<=Alt4)
    {
        so = (elevationov[i][j]-Alt2)/w;
    }
}
}

```

MODELACIÓN HIDROLÓGICA-HIDRÁULICA TOTALMENTE DISTRIBUIDA DE UNA CUENCA FUERTEMENTE ANTROPIZADA – CASO DEL RÍO CASCAVEL (GUARAPUAVA/PR, BRASIL)

```
else if(Alt3<=Alt1 && Alt3<=Alt2 && Alt3<=Alt4)
{
    so = (elevationov[i][j]-Alt3)/w;
}
else
{
    so = (elevationov[i][j]-Alt4)/w;
}
hcell = hov[i][j];
hcordon=(float)(-50.15*pow(hcell,4)+42.13*pow(hcell,3)-
12.907*pow(hcell,2)+2.3993*hcell);
infiltrationrate[i][j]=(float)(0.205*(-
4552.6*pow(so,2)+658*so+11.784)*pow(hcordon,1.667)*0.04);
if(infiltrationrate[i][j]<=0)
{
    infiltrationrate[i][j]=0;
}
}
else if(isoil == 5)
{
    Alt1=9999;
    Alt2=9999;
    Alt3=9999;
    Alt4=9999;
    if(imask[i+1][j] != nodatavalue)
    {
        if(elevationov[(i+1)][j]<elevationov[i][j])
        {
            Alt1=elevationov[(i+1)][j];
        }
    }
    if(imask[i-1][j] != nodatavalue)
    {
        if(elevationov[(i-1)][j]<elevationov[i][j])
        {
            Alt2=elevationov[(i-1)][j];
        }
    }
    if(imask[i][j+1] != nodatavalue)
    {
        if(elevationov[i][j+1]<elevationov[i][j])
        {
            Alt3=elevationov[i][j+1];
        }
    }
    if(imask[i][j-1] != nodatavalue)
    {
        if(elevationov[i][j-1]<elevationov[i][j])
        {
            Alt4=elevationov[i][j-1];
        }
    }
    if(elevationov[i][j]<= Alt1 && elevationov[i][j]<= Alt2 &&
elevationov[i][j]<= Alt3 && elevationov[i][j]<= Alt4)
    {
        hcell = hov[i][j];
        hcordon=(float)(-50.15*pow(hcell,4)+42.13*pow(hcell,3)-
12.907*pow(hcell,2)+2.3993*hcell);
        if (hcordon <= (1.792*khsol[isoil]/capshsol[isoil]))
```

```

{
    dxdh = (hov[i][j]-hcell)/w;
    sf = so - dxdh;
    ncell = (float)0.013;//nmanningov[landuse[i][j]];
    alpha = (float)(pow(fabs(sf),0.5) / ncell);
    Caudal_Pablo = (float)(w * (alpha* pow((hcell),1.667)));
    Lttotal=(float)(0.817*pow(Caudal_Pablo,0.42)*pow(so,0.30)*pow(0.0004, -
0.6));
    if (Lttotal<=khsoil[isoil])
    {
        PorcentajePasante=0.0;
        PorcentajeInsumido=1.0;
    }
    else
    {
        PorcentajePasante
            =(float)(pow((1-
khsoil[isoil]/Lttotal),1.8));
        PorcentajeInsumido=(float)(1-PorcentajePasante);
    }
    infiltrationrate[i][j]=(float)PorcentajeInsumido*Caudal_Pablo*0.04+(1.656*
capshsoil[isoil]*pow(hcordon,1.5)*0.04);
    if(infiltrationrate[i][j]<=0)
    {
        infiltrationrate[i][j]=0;
    }
}
else
{
    dxdh = (hov[i][j]-hcell)/w;
    sf = so - dxdh;
    ncell = (float)0.013;//nmanningov[landuse[i][j]];
    alpha = (float)(pow(fabs(sf),0.5) / ncell);
    Caudal_Pablo = (float)(w * (alpha* pow((hcell),1.667)));
    Lttotal=(float)(0.817*pow(Caudal_Pablo,0.42)*pow(so,0.30)*pow(0.0004, -
0.6));
    if (Lttotal<=khsoil[isoil])
    {
        PorcentajePasante=0.0;
        PorcentajeInsumido=1.0;
    }
    else
    {
        PorcentajePasante
            =(float)(pow((1-
khsoil[isoil]/Lttotal),1.8));
        PorcentajeInsumido=(float)(1-PorcentajePasante);
    }
    infiltrationrate[i][j]=(float)PorcentajeInsumido*Caudal_Pablo*0.04+(2.91*c
apshsoil[isoil]*pow(hcordon,0.5)*0.04);
    if(infiltrationrate[i][j]<=0)
    {
        infiltrationrate[i][j]=0;
    }
}
}
else
{
    if(Alt1<=Alt2 && Alt1<=Alt3 && Alt1<=Alt4)
    {

```

MODELACIÓN HIDROLÓGICA-HIDRÁULICA TOTALMENTE DISTRIBUIDA DE UNA CUENCA FUERTEMENTE ANTROPIZADA – CASO DEL RÍO CASCAVEL (GUARAPUAVA/PR, BRASIL)

```

        so = (elevationov[i][j]-Alt1)/w;
    }
    else if(Alt2<=Alt1 && Alt2<=Alt3 && Alt2<=Alt4)
    {
        so = (elevationov[i][j]-Alt2)/w;
    }
    else if(Alt3<=Alt1 && Alt3<=Alt2 && Alt3<=Alt4)
    {
        so = (elevationov[i][j]-Alt3)/w;
    }
    else
    {
        so = (elevationov[i][j]-Alt4)/w;
    }
    hcell = hov[i][j];
    hcordon=(float)(-50.15*pow(hcell,4)+42.13*pow(hcell,3)-
12.907*pow(hcell,2)+2.3993*hcell);
    infiltrationrate[i][j]=(float)(0.205*(-
4552.6*pow(so,2)+658*so+11.784)*pow(hcordon,1.667)*0.04);
    dxdh = (hov[i][j]-hcell)/w;
    sf = so - dxdh;
    ncell = (float)0.013;//nmanningov[landuse[i][j]];
    alpha = (float)(pow(fabs(sf),0.5) / ncell);
    Caudal_Pablo = (float)(w * (alpha* pow((hcell),1.667)));
    Caudal_Pablo=Caudal_Pablo-infiltrationrate[i][j];
    if(Caudal_Pablo<0)
    {
        Lttotal=0;
    }
    else
    {
        Lttotal=(float)(0.817*pow(Caudal_Pablo,0.42)*pow(so,0.30)*pow(0.0004, -
0.6));
    }
    if (Lttotal<=khsoil[isoil])
    {
        PorcentajePasante=0.0;
        PorcentajeInsumido=1.0;
    }
    else
    {
        PorcentajePasante
                                =(float)(pow((1-
khsoil[isoil]/Lttotal),1.8));
        PorcentajeInsumido=(float)(1-PorcentajePasante);
    }
    infiltrationrate[i][j]=(float)(infiltrationrate[i][j]+Caudal_Pablo*Porcent
ajeInsumido*0.04);
    if(infiltrationrate[i][j]<=0)
    {
        infiltrationrate[i][j]=0;
    }
}
}
else if(isoil == 6)
{
    Alt1=9999;
    Alt2=9999;
    Alt3=9999;
    Alt4=9999;
    if(imask[i+1][j] != nodatavalue)

```

```

{
    if(elevationov[(i+1)][j]<elevationov[i][j])
    {
        Alt1=elevationov[(i+1)][j];
    }
}
if(imask[i-1][j] != nodatavalue)
{
    if(elevationov[(i-1)][j]<elevationov[i][j])
    {
        Alt2=elevationov[(i-1)][j];
    }
}
if(imask[i][j+1] != nodatavalue)
{
    if(elevationov[i][j+1]<elevationov[i][j])
    {
        Alt3=elevationov[i][j+1];
    }
}
if(imask[i][j-1] != nodatavalue)
{
    if(elevationov[i][j-1]<elevationov[i][j])
    {
        Alt4=elevationov[i][j-1];
    }
}
if(elevationov[i][j]<= Alt1 && elevationov[i][j]<= Alt2 &&
elevationov[i][j]<= Alt3 && elevationov[i][j]<= Alt4)
{
    hcell = hov[i][j];
    hcordon=(float)(-50.15*pow(hcell,4)+42.13*pow(hcell,3)-
12.907*pow(hcell,2)+2.3993*hcell);
    if (hcordon <= (1.792*khsoil[isoil]/capshsoil[isoil]))
    {
        dxdh = (hov[i][j]-hcell)/w;
        sf = so - dxdh;
        ncell = (float)0.013;//nmanningov[landuse[i][j]];
        alpha = (float)(pow(fabs(sf),0.5) / ncell);
        Caudal_Pablo = (float)(w * (alpha* pow((hcell),1.667)));
        Lttotal=(float)(0.817*pow(Caudal_Pablo,0.42)*pow(so,0.30)*pow(0.0004, -
0.6));
        if (Lttotal<=khsoil[isoil])
        {
            PorcentajePasante=0.0;
            PorcentajeInsumido=1.0;
        }
        else
        {
            PorcentajePasante
                =(float)(pow((1-
khsoil[isoil]/Lttotal),1.8));
            PorcentajeInsumido=(float)(1-PorcentajePasante);
        }
        infiltrationrate[i][j]=(float)PorcentajeInsumido*Caudal_Pablo*0.04+(1.656*
capshsoil[isoil]*pow(hcordon,1.5)*0.04);
        if(infiltrationrate[i][j]<=0)
        {
            infiltrationrate[i][j]=0;
        }
    }
}

```

**MODELACIÓN HIDROLÓGICA-HIDRÁULICA TOTALMENTE DISTRIBUIDA DE UNA CUENCA
FUERTEMENTE ANTROPIZADA – CASO DEL RÍO CASCAVEL (GUARAPUAVA/PR, BRASIL)**

```

    }
    else
    {
        dxdh = (hov[i][j]-hcell)/w;
        sf = so - dxdh;
        ncell = (float)0.013;//nmanningov[landuse[i][j]];
        alpha = (float)(pow(fabs(sf),0.5) / ncell);
        Caudal_Pablo = (float)(w * (alpha* pow((hcell),1.667)));
        Lttotal=(float)(0.817*pow(Caudal_Pablo,0.42)*pow(so,0.30)*pow(0.0004, -
0.6));
        if (Lttotal<=khsoil[isoil])
        {
            PorcentajePasante=0.0;
            PorcentajeInsumido=1.0;
        }
        else
        {
            PorcentajePasante = (float)(pow((1-
khsoil[isoil]/Lttotal),1.8));
            PorcentajeInsumido=(float)(1-PorcentajePasante);
        }
        infiltrationrate[i][j]=(float)PorcentajeInsumido*Caudal_Pablo*0.04+(2.91*c
apshsoil[isoil]*pow(hcordon,0.5)*0.04);
        if(infiltrationrate[i][j]<=0)
        {
            infiltrationrate[i][j]=0;
        }
    }
}
else
{
    if(Alt1<=Alt2 && Alt1<=Alt3 && Alt1<=Alt4)
    {
        so = (elevationov[i][j]-Alt1)/w;
    }
    else if(Alt2<=Alt1 && Alt2<=Alt3 && Alt2<=Alt4)
    {
        so = (elevationov[i][j]-Alt2)/w;
    }
    else if(Alt3<=Alt1 && Alt3<=Alt2 && Alt3<=Alt4)
    {
        so = (elevationov[i][j]-Alt3)/w;
    }
    else
    {
        so = (elevationov[i][j]-Alt4)/w;
    }
    hcell = hov[i][j];
    hcordon=(float)(-50.15*pow(hcell,4)+42.13*pow(hcell,3)-
12.907*pow(hcell,2)+2.3993*hcell);
    infiltrationrate[i][j]=(float)(0.205*(-
4552.6*pow(so,2)+658*so+11.784)*pow(hcordon,1.667)*0.04);
    dxdh = (hov[i][j]-hcell)/w;
    sf = so - dxdh;
    ncell = (float)0.013;//nmanningov[landuse[i][j]];
    alpha = (float)(pow(fabs(sf),0.5) / ncell);
    Caudal_Pablo = (float)(w * (alpha* pow((hcell),1.667)));
    Caudal_Pablo=Caudal_Pablo-infiltrationrate[i][j];
    if(Caudal_Pablo<0)

```

```

        {
            Lttotal=0;
        }
        else
        {
            Lttotal=(float)(0.817*pow(Caudal_Pablo,0.42)*pow(so,0.30)*pow(0.0004, -
0.6));
        }
        if (Lttotal<=khsoil[isoil])
        {
            PorcentajePasante=0.0;
            PorcentajeInsumido=1.0;
        }
        else
        {
            PorcentajePasante
            =(float)(pow((1-
khsoil[isoil]/Lttotal),1.8));
            PorcentajeInsumido=(float)(1-PorcentajePasante);
        }
        infiltrationrate[i][j]=(float)(infiltrationrate[i][j]+Caudal_Pablo*Porcent
ajeInsumido*0.04);
        if(infiltrationrate[i][j]<=0)
        {
            infiltrationrate[i][j]=0;
        }
    }
}
else
{
//set first and second terms for infiltration rate equation
p1 = (float)(khsoil[isoil]*dt[idt] - 2.0*infiltrationdepth[i][j]);
p2 =
    khsoil[isoil]*(infiltrationdepth[i][j]
+
capshsoil[isoil]*soilmd[isoil]);
//Compute infiltration rate (m/s)
infiltrationrate[i][j] = (float)((p1 + sqrt(pow(p1,2.0) +
8.0*p2*dt[idt]))/(2.0*dt[idt]));
}
//check if the infiltration potential exceeds the available water
if(infiltrationrate[i][j]*dt[idt] > hov[i][j])
{
//limit infiltration rate to available water supply
infiltrationrate[i][j] = hov[i][j] / dt[idt];
}
//end check of infiltration potential
}
else //else soiltemp[][][] <= 0.0
{
//set the infiltration rate to zero
infiltrationrate[i][j] = 0.0;
}
//end if soiltemp[][][] > 0

```

Anexo II – Validación de los cambios realizados en el cambio del código fuente.

En esta sección, se presentan los ejemplos teóricos utilizados para realizar la validación de las modificaciones realizadas en el código fuente de TREX para que el mismo simule los caudales captados por las bocas de tormenta de distintos tipos.

Para la validación de la modificación realizada, se utilizaron ejemplos teóricos presentes en la bibliografía ([Mays, 2004](#)).

Por ejemplo, el ejercicio 5.8 del libro mencionado, que se presenta en la Figura 10-1.

Example 5.8

Compute the interception capacity of a 3.5-m long curb-opening inlet in a triangular gutter section having a cross slope of 0.025 m/m, longitudinal slope of 0.03 m/m, and Manning's roughness of 0.015. The gutter carries a design discharge of 0.08 m³/s.

Solution

Step 1. Compute the curb opening length, L_T , required for complete interception from Eq. (5.25).

$$L_T = K_o Q^{0.42} S_L^{0.3} (n S_x)^{-0.6} = (0.817)(0.08)^{0.42} (0.03)^{0.3} [(0.015)(0.025)]^{-0.6} = 10.8 \text{ m}$$

Step 2. Determine the inlet efficiency, E , using Eq. (5.26).

$$E = 1 - \left(1 - \frac{L}{L_T}\right)^{1.8} = 1 - \left(1 - \frac{3.5}{10.8}\right)^{1.8} = 0.506 \text{ or } 50.6\%$$

Step 3. Determine the inlet interception capacity using Eq. (5.18).

$$Q_i = EQ = (0.506)(0.08) = 0.041 \text{ m}^3/\text{s}$$

Figura 10-1 - Ejemplo 5.8 de [Mays \(2004\)](#).

En el ejemplo se calcula el caudal interceptado por una boca de tormenta vertical de 3,5 metros de largo, en un cordón cuneta de forma triangular con una pendiente transversal de 0,025 m/m, pendiente longitudinal de 0,03 m/m y un coeficiente de Manning de 0,015. El caudal de diseño es de 0,08 m³/s.

El caudal captado teórico es de 0,041 m³/s.

Teniendo en cuenta que en el código TREX modificado se fija una pendiente transversal del 3% y un n de manning de 0,013 se recalcula el ejemplo:

$$L_t = 0,817 * 0,08^{0.42} * 0,03^{0.3} * \left(\frac{1}{0,013 * 0,03}\right)^{0.6} \quad (10-1)$$

$$L_t = 10,96 \text{ m} \quad (10-2)$$

$$E = 1 - \left(1 - \frac{3,5}{10,96}\right)^{1.8} \quad (10-3)$$

$$E = 0,4994 \quad (10-4)$$

$$Q_i = 0,0399 \text{ m}^3/\text{s} \quad (10-5)$$

Para corroborar lo anterior, se realizó un modelo sencillo en TREX que respete las características del problema, es decir, que el modelo digital de elevación sea de tal forma de que exista una pendiente longitudinal igual a la del ejercicio teórico. En el mapa de tipo de suelo se indica que existe una boca de tormenta vertical, en el archivo input se indica que esta boca tiene una longitud de 3,5 m y por último se ingresa un caudal puntual igual a $0,08 \text{ m}^3/\text{s}$.

Teniendo en cuenta de que si el caudal captado es $0,0399 \text{ m}^3/\text{s}$ el caudal pasante es de $0,0401 \text{ m}^3/\text{s}$.

A continuación las imágenes que representan el modelo digital de elevación y el mapa de tipo de suelo (Figura 10-2 y Figura 10-3). Por otro lado, en la Figura 10-4 se presenta una visualización del archivo en donde se indica las características de la longitud de la boca de tormenta vertical

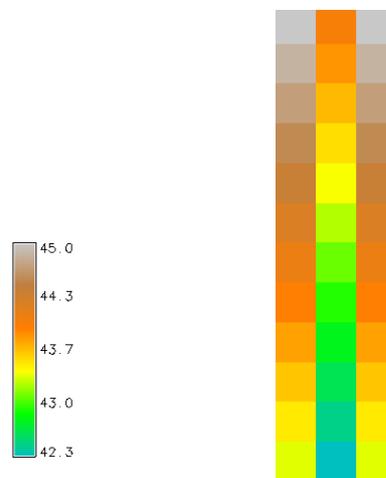


Figura 10-2 - Modelo digital de elevación para representar ejemplo teórico.

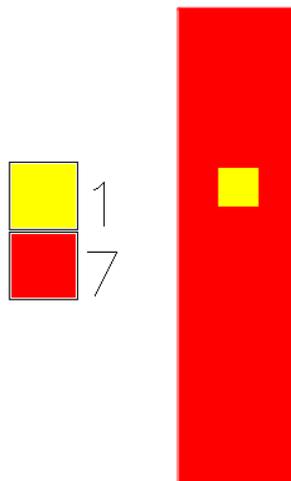


Figura 10-3 - Tipo de suelo del modelo.

MODELACIÓN HIDROLÓGICA-HIDRÁULICA TOTALMENTE DISTRIBUIDA DE UNA CUENCA FUERTEMENTE ANTROPIZADA – CASO DEL RÍO CASCAVEL (GUARAPUAVA/PR, BRASIL)

```

NSOILS 7
3.5 0 0 BocadeTormentaVerticalde3.5m
0 0 0
0 0 0
0 0 0
0 0 0
0 0 0
4.0000E-09 0.1903 0.000 Suelo Impermeable
SOIL_TYPES Input/TipoSueloBoca.txt
    
```

Figura 10-4 - Indicación de características de la boca de tormenta vertical en el archivo input.

Con el modelo anterior, se puede corroborar en primer lugar en la celda de salida de la cuenca el caudal de salida que sería el caudal pasante (Figura 10-5).

Por otro lado, se puede calcular el caudal infiltrado en la celda correspondiente en a la boca de tormenta en el mapa de salida de velocidad de infiltración de TREX (Figura 10-6).

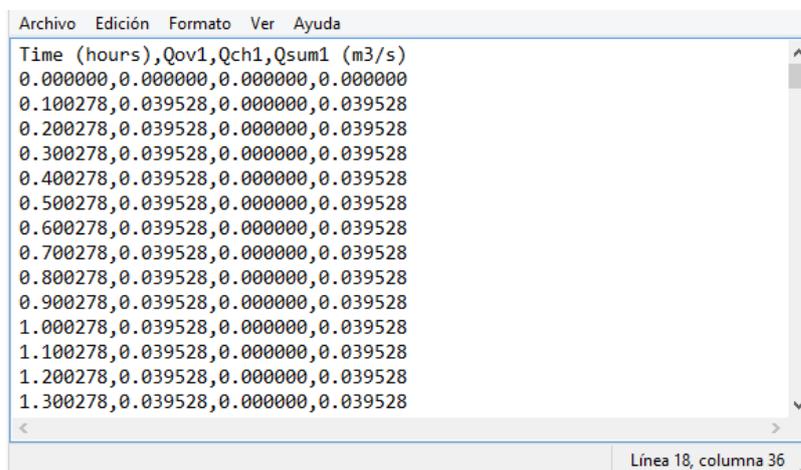


Figura 10-5 - Salida del modelo en TREX, caudal pasante [m³/s].

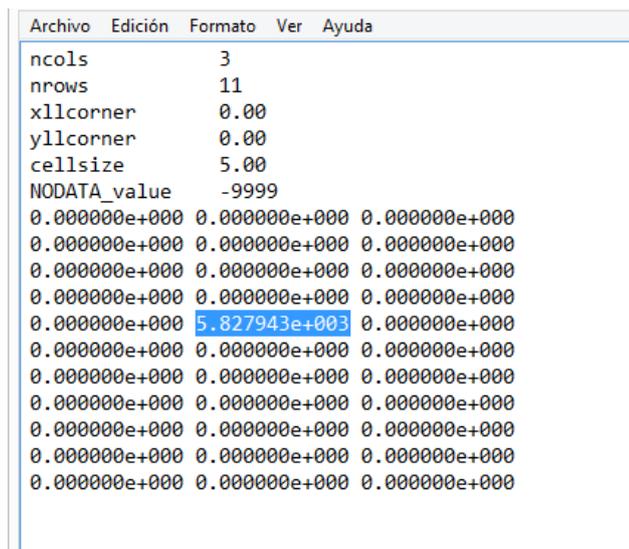


Figura 10-6 - Mapa de salida de velocidad de infiltración para el tiempo 2.1 de simulación en [mm/h].

Para calcular el caudal infiltrado, se debe tener en cuenta que el valor del mapa es por m², por lo tanto es necesario multiplicar por el área de la celda.

$$Q_{iTREX} = V_{inf} * A_c \quad (10-6)$$

En este ejemplo:

$$Q_{iTREX} = 582,7943 \frac{mm}{h \cdot m^2} * 25 m^2 * \frac{1 h}{3600 s} * \frac{1 m}{1000 mm} \quad (10-7)$$

$$Q_{iTREX} = 0,0404 m^3/s \quad (10-8)$$

En la Tabla 10-1 se comparan los resultados obtenidos a través de TREX con los obtenidos con las fórmulas teóricas.

Tabla 10-1 - Comparación de cálculo teórico y cálculo en TREX de boca de tormenta vertical.

	Cálculo Teórico	Cálculo en TREX	Diferencia TREX con cálculo teórico
Caudal Captado	0,0399 m ³ /s	0,0404 m ³ /s	1,2 %
Caudal Pasante	0,0401 m ³ /s	0,03952 m ³ /s	1,4 %

Lo anterior, se considera aceptable, teniendo en cuenta las consideraciones adoptadas en el modelo TREX.

Según el cálculo teórico realizado, la longitud teórica de la boca para captar la totalidad del caudal (0,08 m³/s) es de 10,96 metros. Por lo que se realiza una segunda modelación con una boca de tormenta de dicho largo para verificar que se insuma aproximadamente todo el caudal en la boca de tormenta.

Así se obtiene, como caudal pasante es el que se observa en el punto de salida, en el archivo de salida del modelo, en este caso de 0,0 m³/s como debe ser (Figura 10-7).

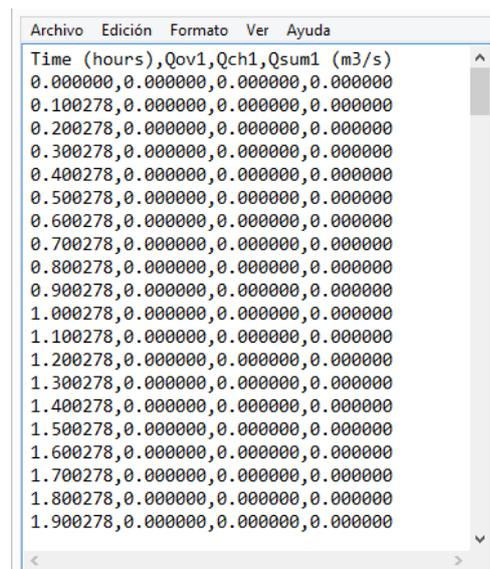


Figura 10-7 - Caudal pasante en el punto más bajo de la cuenca.

MODELACIÓN HIDROLÓGICA-HIDRÁULICA TOTALMENTE DISTRIBUIDA DE UNA CUENCA FUERTEMENTE ANTROPIZADA – CASO DEL RÍO CASCAVEL (GUARAPUAVA/PR, BRASIL)

Por otro lado, el caudal captado, se puede determinar por el mapa de velocidad de infiltración (Figura 10-8).

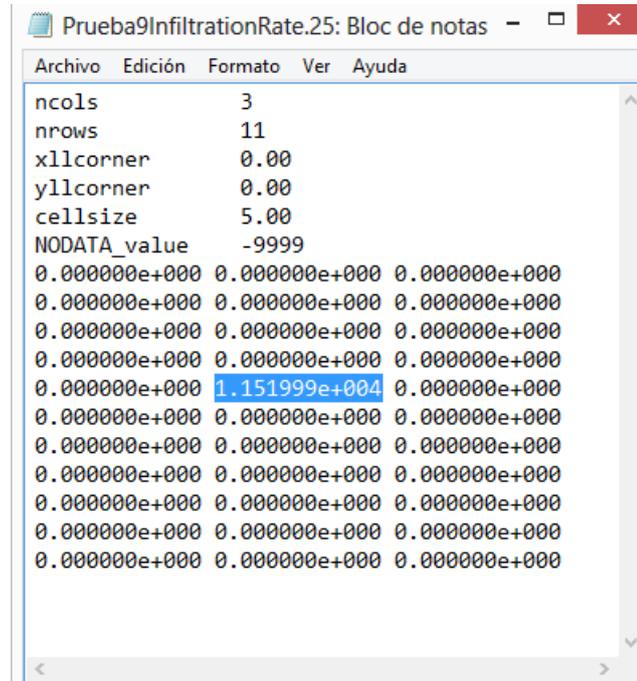


Figura 10-8 - Mapa de velocidades de infiltración [mm/h].

El caudal captado, de la misma que anteriormente, se calcula de la siguiente manera

$$Q_{iTREX} = 1151,999 \frac{mm}{h \cdot m^2} * 25 m^2 * \frac{1 h}{3600 s} * \frac{1 m}{1000 mm} \quad (10-9)$$

$$Q_{iTREX} = 0,08 m^3/s \quad (10-10)$$

Es decir, el modelo TREX simula de forma adecuada las bocas de tormenta verticales en punto medio.

En segundo lugar, se verificó el funcionamiento de la boca de tormenta vertical en un punto bajo. En este caso, se tomó como caudal ingresante de 0,2 m³/seg.

Se modificó el modelo digital de elevaciones para que ahora la celda de la boca de tormenta se encuentre en un punto bajo y que al elevar el tirante de agua por encima de 0,40 m el excedente de escurrimiento se dirige hacia la celda adyacente (Figura 10-9).

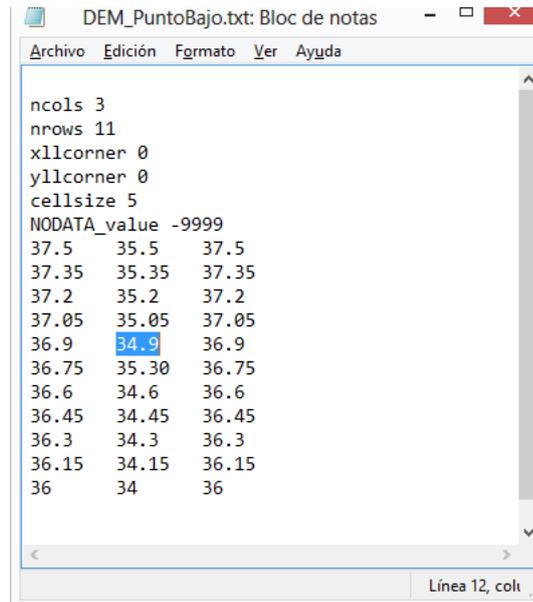


Figura 10-9 - MDE de boca de tormenta en punto bajo, con posibilidad de caudal pasante a celda aguas abajo.

Para comprobar si TREX modificado simula adecuadamente el comportamiento de la boca de tormenta vertical en punto bajo, se visualiza la altura de escurrimiento en las celdas [m] cuando el sistema entra en régimen y se observa que en la celda donde se encuentra en la boca de tormenta la altura es de 0,0583 m (Figura 10-10).

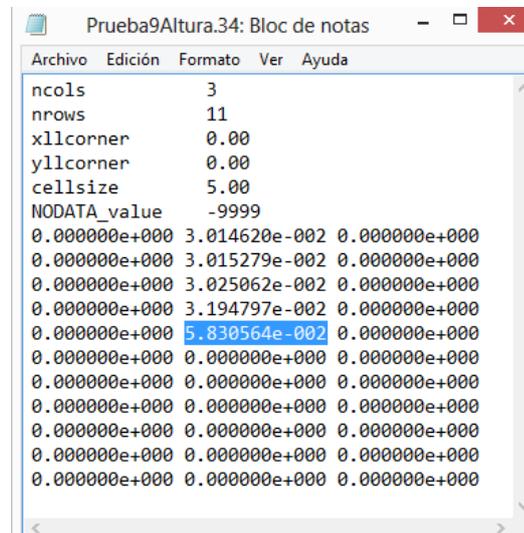


Figura 10-10 - Mapa de altura de escurrimiento en el modelo TREX, tiempo de simulación: 3,4 horas.

Para determinar si la boca vertical en punto bajo trabaja como vertedero u orificio, se debe determinar previamente el y_0 es decir, la altura de escurrimiento en la zona de cordón, teniendo en cuenta $h_{celda} = 0,0583$ m.

$$y_0 = -50,155 h_{celda}^4 + 42,131 h_{celda}^3 - 12,907 h_{celda}^2 + 2,3993 h_{celda} \quad (10-11)$$

$$y_0 = 0,103786 \text{ m} \quad (10-12)$$

Se observa, que el tirante de agua en el cordón es menor a 0,225 m, es decir, menor a 1,5 h, por lo tanto la boca de tormenta funciona como vertedero y se debería cumplir la relación siguiente, siendo el resultado del Q_i igual a 0,20 m³/s.

$$Q_i = 1,656 L_c y_0^{1.5} \quad (10-13)$$

$$Q_i = 1,656 \cdot 3,5 \text{ m} \cdot 0,103786 \text{ m}^{1.5} \quad (10-14)$$

$$Q_i = 0,18724 \text{ m}^3/\text{s} \quad (10-15)$$

De la misma forma, se puede incorporar un caudal mayor para que el tirante sea tal que la boca actúe como orificio. Se ingresa un caudal puntual de 0,65 m³/s.

De esta forma, se tiene una altura de escurrimiento en el modelo en la celda correspondiente a la ubicación de la boca de tormenta de 0,2408 m (Figura 10-11).

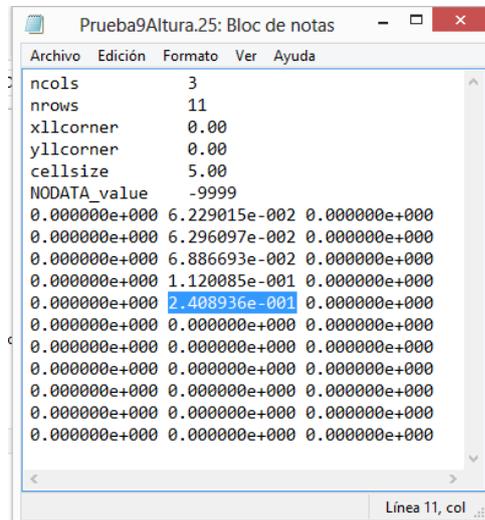


Figura 10-11 - Mapa de altura de escurrimiento.

Teniendo en cuenta la altura de la celda, corresponde una altura de tirante en el cordón igual a 0,249 m. Esto es mayor a la condición de 1,5 h, por lo que actúa como orificio, debiéndose cumplir la siguiente relación:

$$Q_i = 0,67 L_c h [2 g (y_0 - h/2)]^{1/2} \quad (10-16)$$

$$Q_i = 0,67 \cdot 3,5 \cdot 0,15 [2 \cdot 9,81 (0,249 - 0,075)]^{1/2} \quad (10-17)$$

$$Q_i = 0,6498 \text{ m}^3/\text{s}. \quad (10-18)$$

Es decir, también queda verificada la boca de tormenta vertical en punto bajo.

Por otro lado, se procede a la verificación de la simulación de la boca de tormenta horizontal en punto intermedio y punto bajo.

Para ello, se recuerda la ecuación que se busca simular en TREX.

$$Q_i = 0,205 K y^{5/3} \quad (10-19)$$

Se tiene en cuenta un caudal ingresado de $0,08 \text{ m}^3/\text{s}$ y una pendiente longitudinal de $0,03 \text{ m/m}$.

El modelo digital de elevación es idéntico al utilizado para verificar la boca de tormenta vertical en punto intermedio.

Según lo anterior, se puede determinar el coeficiente K es igual a: 24,48. Esto es teniendo en cuenta las mismas características de la boca mencionadas anteriormente. En la Figura 10-12 se presenta la relación utilizada entre la pendiente longitudinal y el factor K.

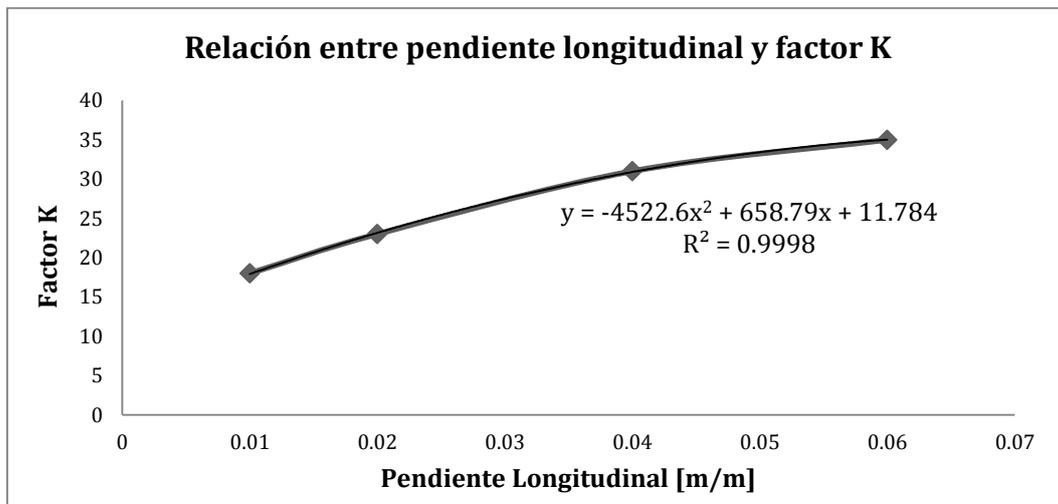


Figura 10-12 - Obtención de una relación para K para bocas de tormenta en punto bajo.

Luego, dependiendo el tirante de agua en la celda y en el cordón se obtiene el caudal captado por la boca de tormenta.

Simulando con los datos anteriores, se obtiene un tirante en la celda de $0,01763 \text{ m}$ y un caudal pasante de $0,059485 \text{ m}^3/\text{s}$.

Por lo anterior, la altura de escurrimiento en el cordón es de $0,0156174 \text{ m}$.

$$Q_i = 0,205 \cdot 24,48 \cdot 0,03448^{5/3} = 0,018331 \text{ m}^3/\text{s}$$

Por lo tanto, teóricamente, el caudal pasante debe ser: $0,08 \text{ m}^3/\text{s} - 0,018331 \text{ m}^3/\text{s} = 0,061669 \text{ m}^3/\text{s}$. La diferencia entre el caudal pasante resultado de la modelación y el caudal teórico es del 3,5 % por lo que se considera aceptable la diferencia.

De manera similar se procede con el cálculo del caudal captado en la boca de tormenta horizontal en punto bajo.

El modelo digital es idéntico al utilizado en la verificación de la boca de tormenta vertical en punto bajo.

En este caso, se debe cumplir con las ecuaciones:

$$\frac{Q_i}{P_R} = 1,656 y^{1.5} \quad (10-20)$$

$$\frac{Q_i}{A_u} = 2,91 y^{0.5} \quad (10-21)$$

Dependiendo si trabaja como vertedero u orificio.

Se ingresa las variables P_R y A_u igual a 1.

El caudal ingresado en primer lugar es de $0,08 \text{ m}^3/\text{s}$.

Se obtiene una altura de tirante de agua en la celda de $0,0837$ metros (Figura 10-13) y una altura de escurrimiento en el cordón de $0,1326 \text{ m}$.

Este valor es menor al de $1,792 (A_u/P_R)$ por lo que actúa como vertedero y se debe calcular con la ecuación 4-30. Como en este caso no existe caudal pasante, el caudal captado debe ser de $0,08 \text{ m}^3/\text{s}$.

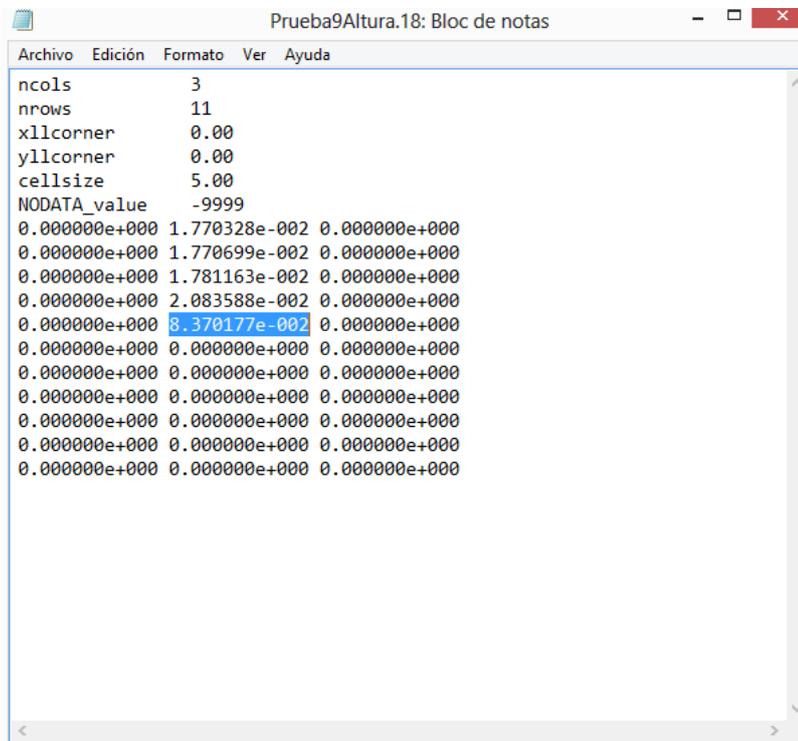


Figura 10-13 - Mapa de altura de escurrimiento.

$$Q_{i\text{TREX}} = 1,656 * 0,1326^{1.51} = 0,0799 \text{ m}^3/\text{s}$$

El caudal captado es practicamente igual al caudal captado teórico por lo que se considera verificada.

Anexo III – Hidrogramas de crecida en distintos puntos de la cuenca.

En esta sección, se presentan los hidrogramas de crecida de cada evento, en 8 puntos interiores de la Cuenca del Río Cascavel, a la salida de cada arroyo afluente caracterizado y en distintos puntos del cauce principal. En la siguiente imagen (Figura 11-1) se presentan cada punto seleccionado para la extracción de los hidrogramas.

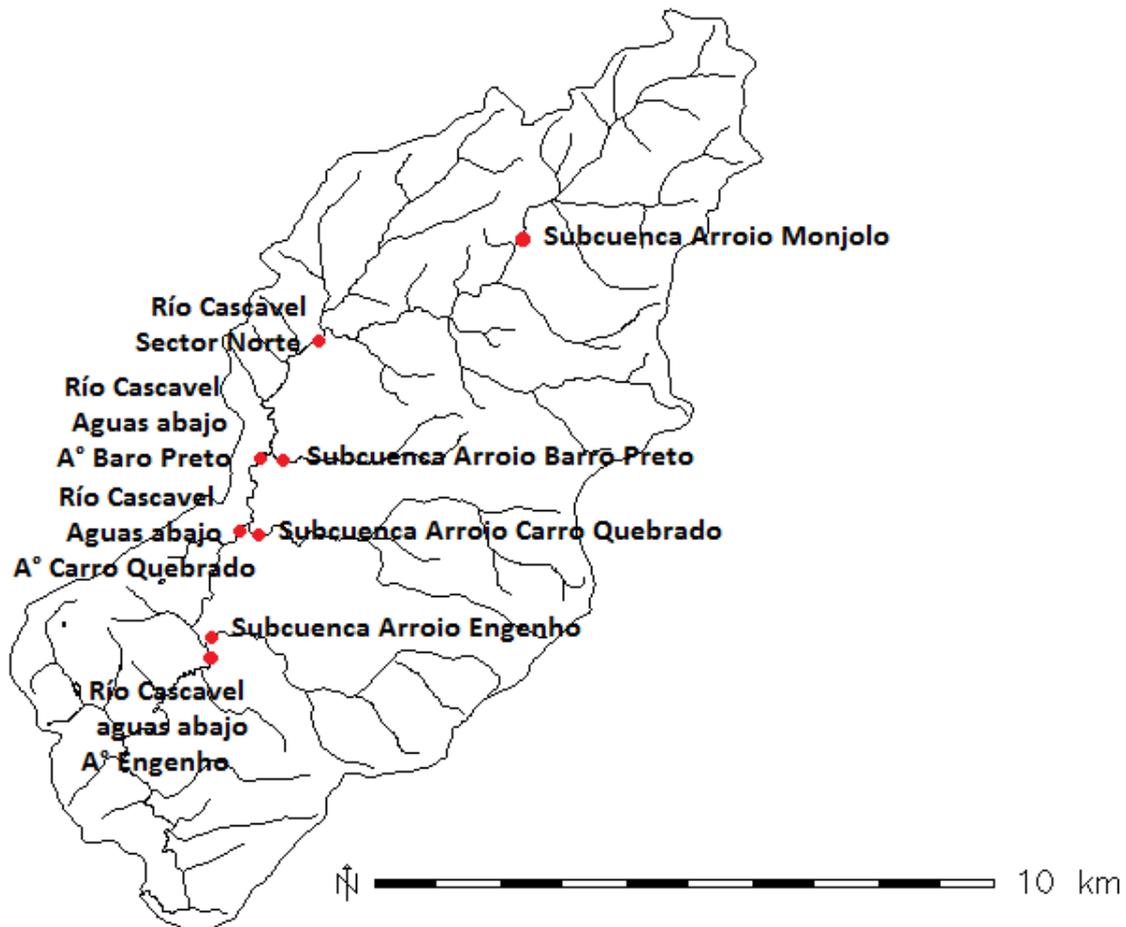


Figura 11-1 – Puntos de extracción de caudales en cada modelación.

11.1. Evento 3.

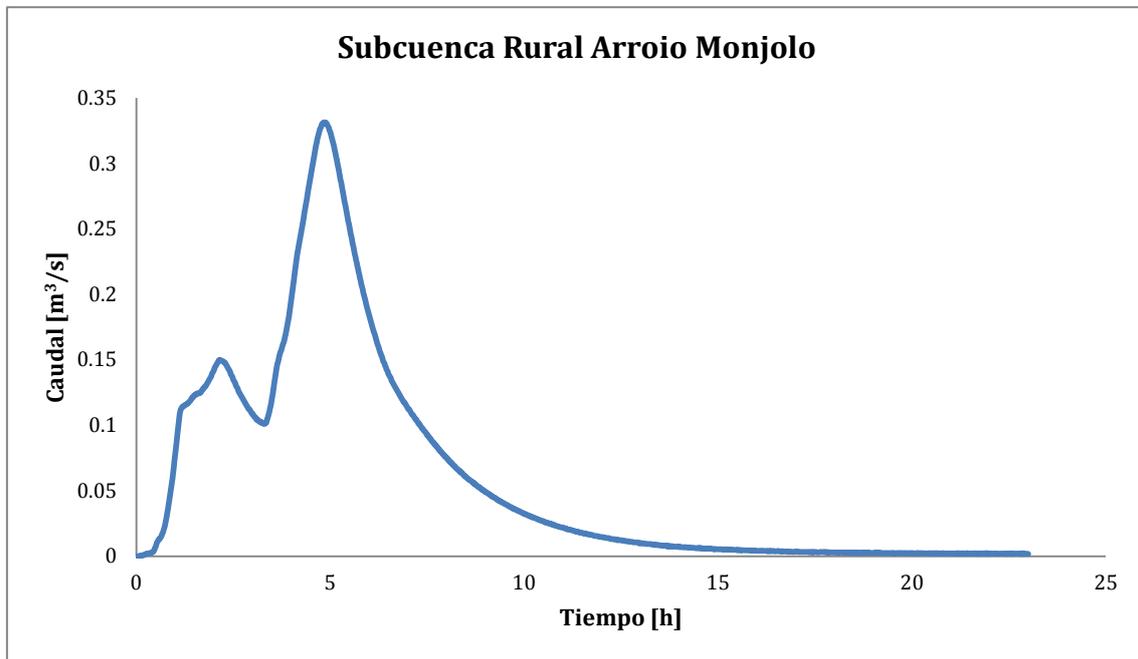


Figura 11-2 - Evento 3. Hidrograma de salida de la subcuenca del Arroio Monjolo.

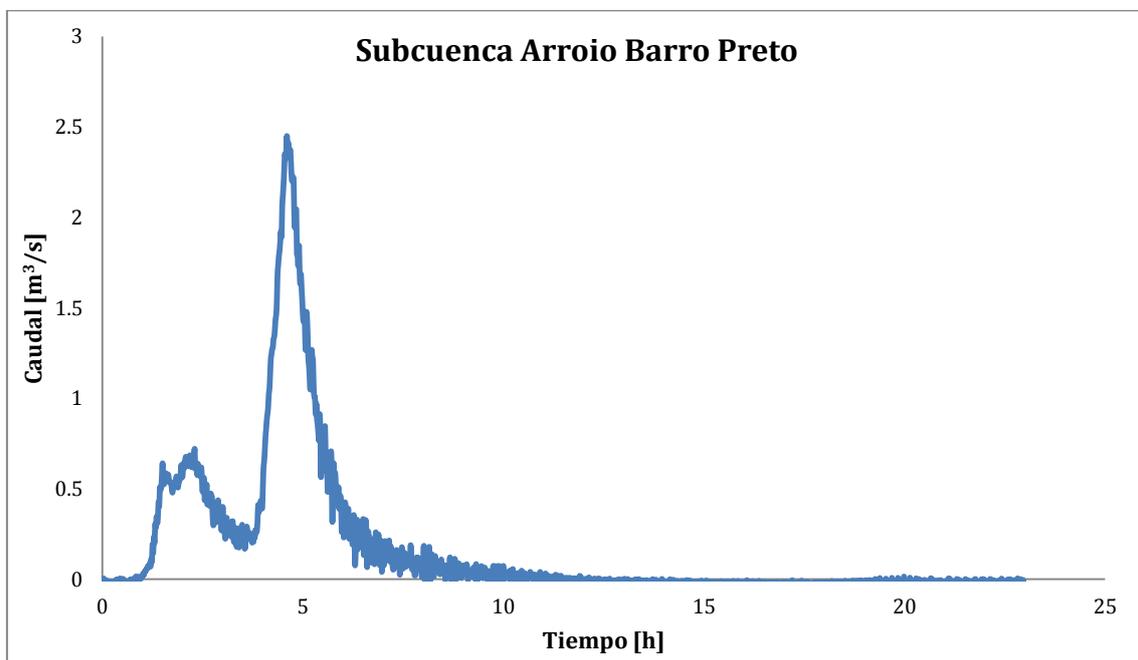


Figura 11-3 - Evento 3. Hidrograma de salida de la subcuenca del Arroio Barro Preto.

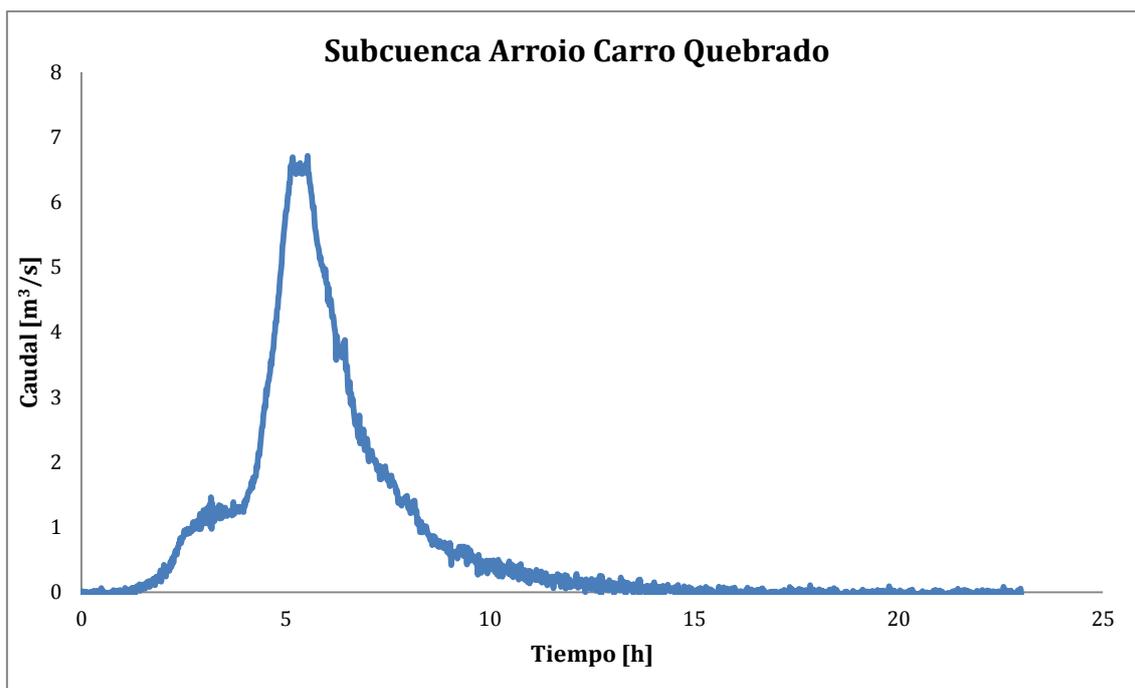


Figura 11-4 - Evento 3. Hidrograma de salida de la subcuenca del Arroio Carro Quebrado.

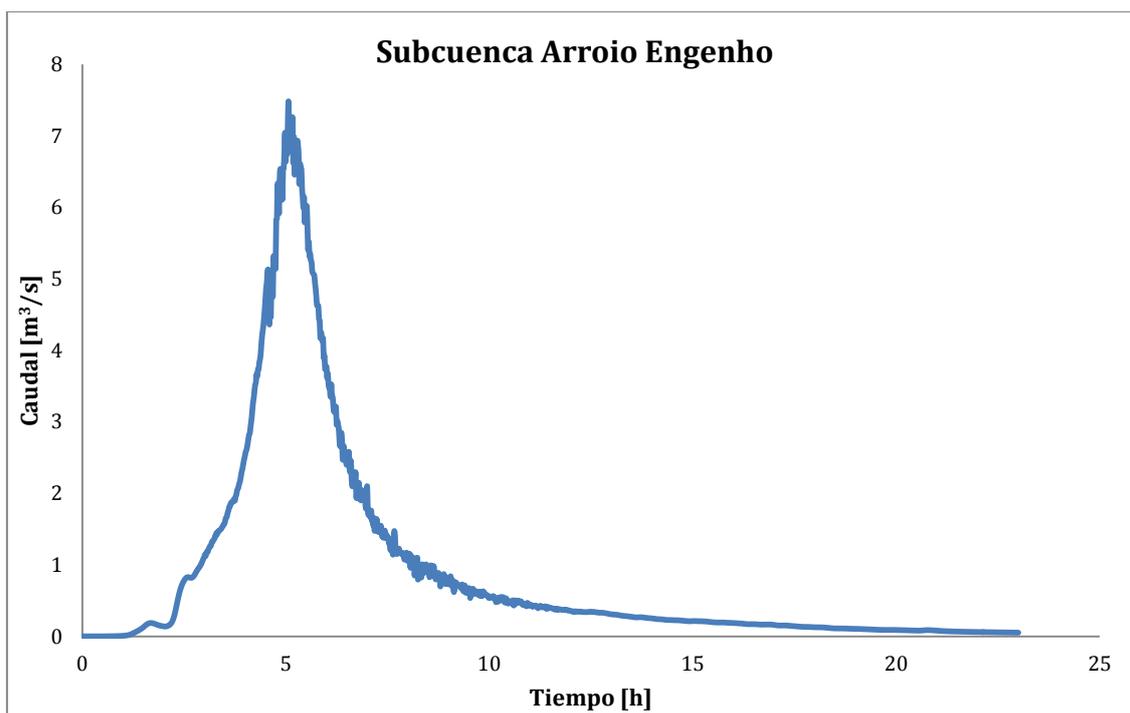


Figura 11-5 - Evento 3. Hidrograma de salida de la subcuenca del Arroio Engenho.

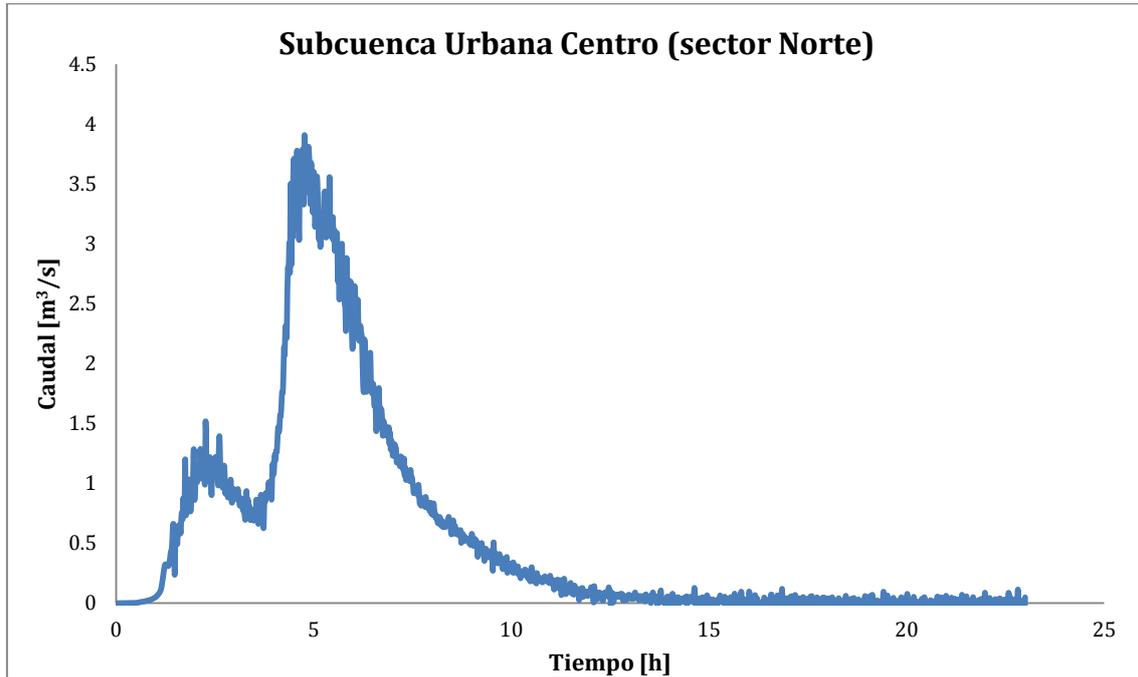


Figura 11-6 - Evento 3. Hidrograma de salida en el Río Cascavel, sector norte.

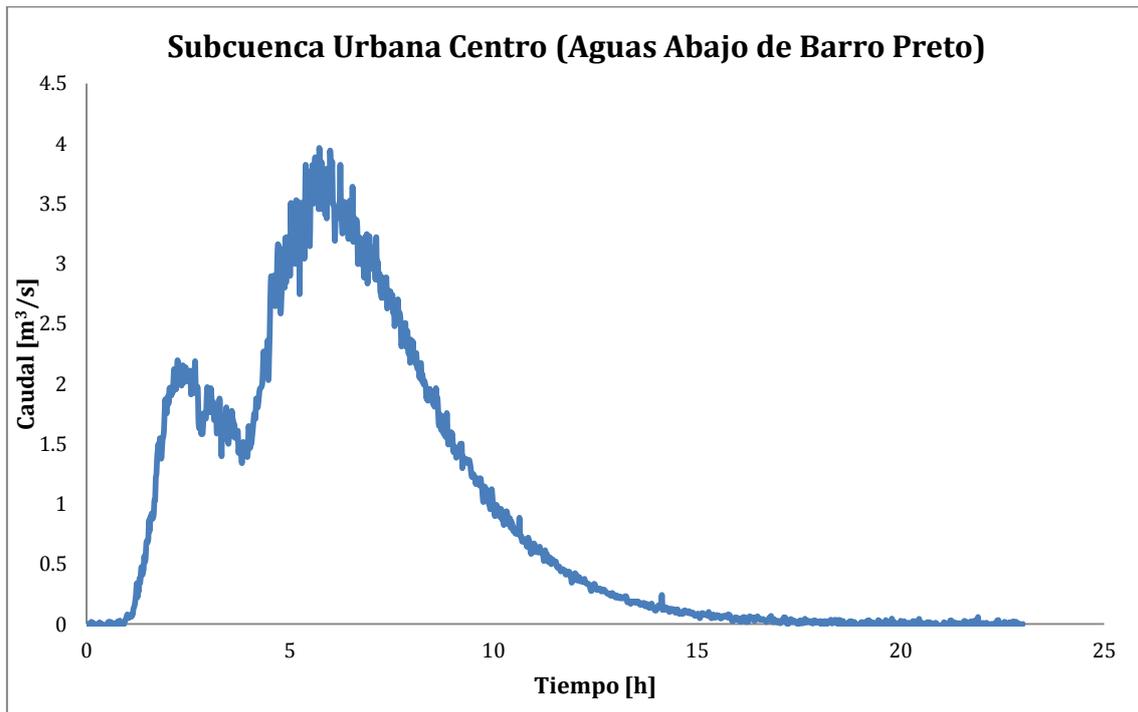


Figura 11-7 - Evento 3. Hidrograma de salida en el Río Cascavel, aguas abajo de Arroio Barro Preto.

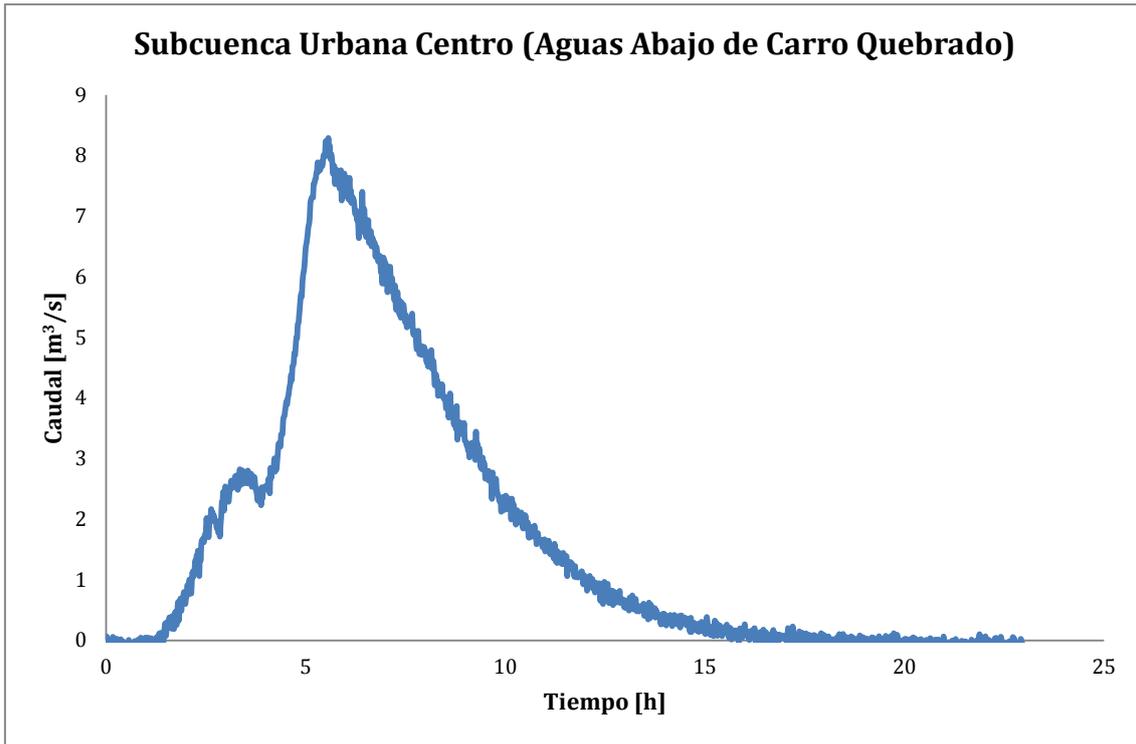


Figura 11-8 – Evento 3. Hidrograma de salida en el Río Cascavel, aguas abajo de Arroio Carro Quebrado.

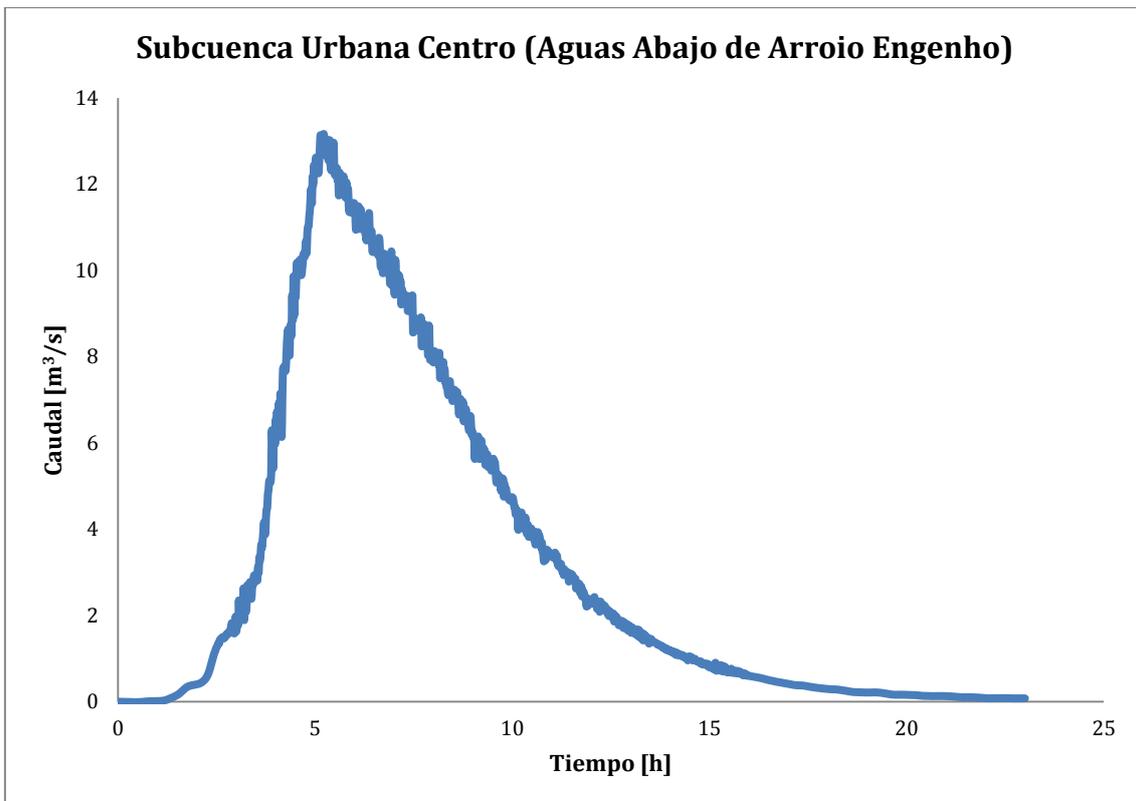


Figura 11-9 – Evento 3. Hidrograma de salida en el Río Cascavel, aguas abajo de Arroio Engenho.

11.2. Evento 5.

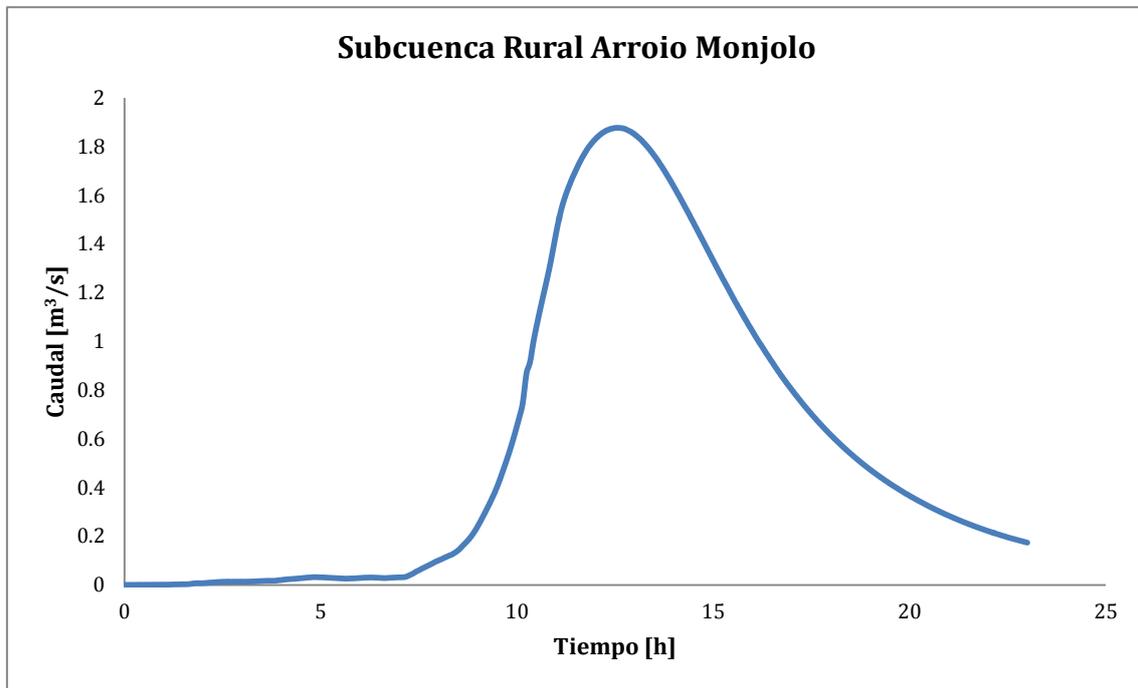


Figura 11-10 - Evento 5. Hidrograma de salida de la subcuenca del Arroio Monjolo.

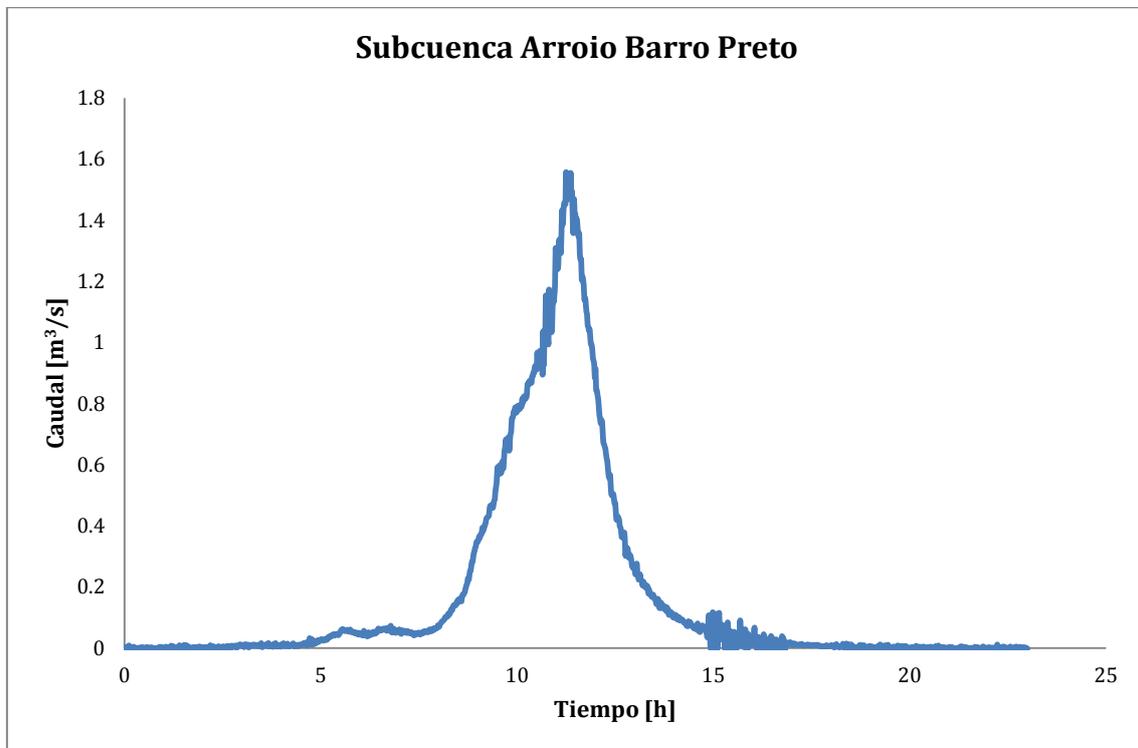


Figura 11-11 - Evento 5. Hidrograma de salida de la subcuenca del Arroio Barro Preto.

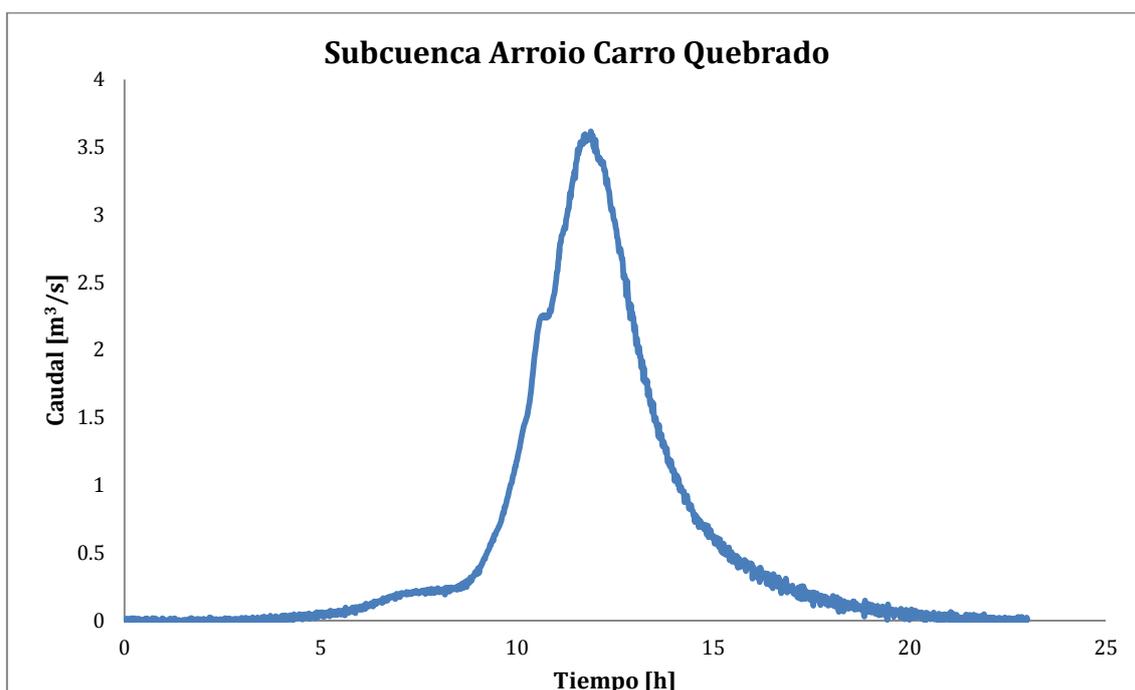


Figura 11-12 - Evento 5. Hidrograma de salida de la subcuenca del Arroio Carro Quebrado.

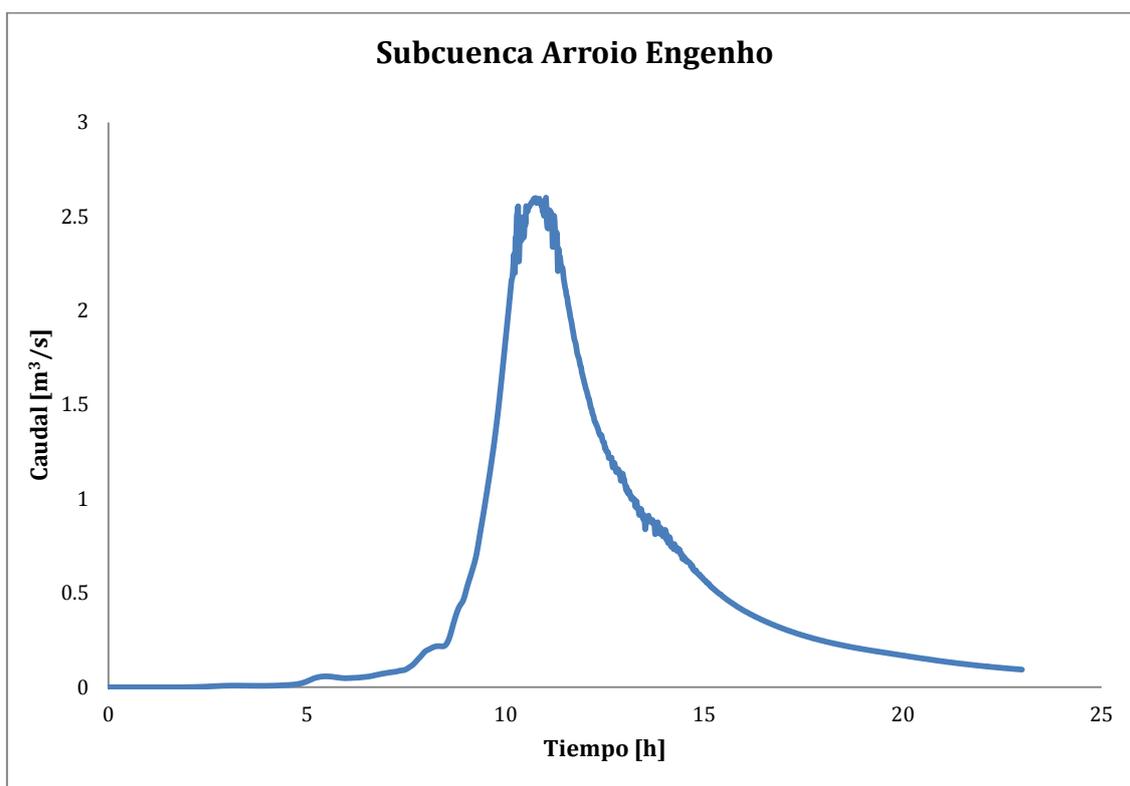


Figura 11-13 - Evento 5. Hidrograma de salida de la subcuenca del Arroio Engenho.

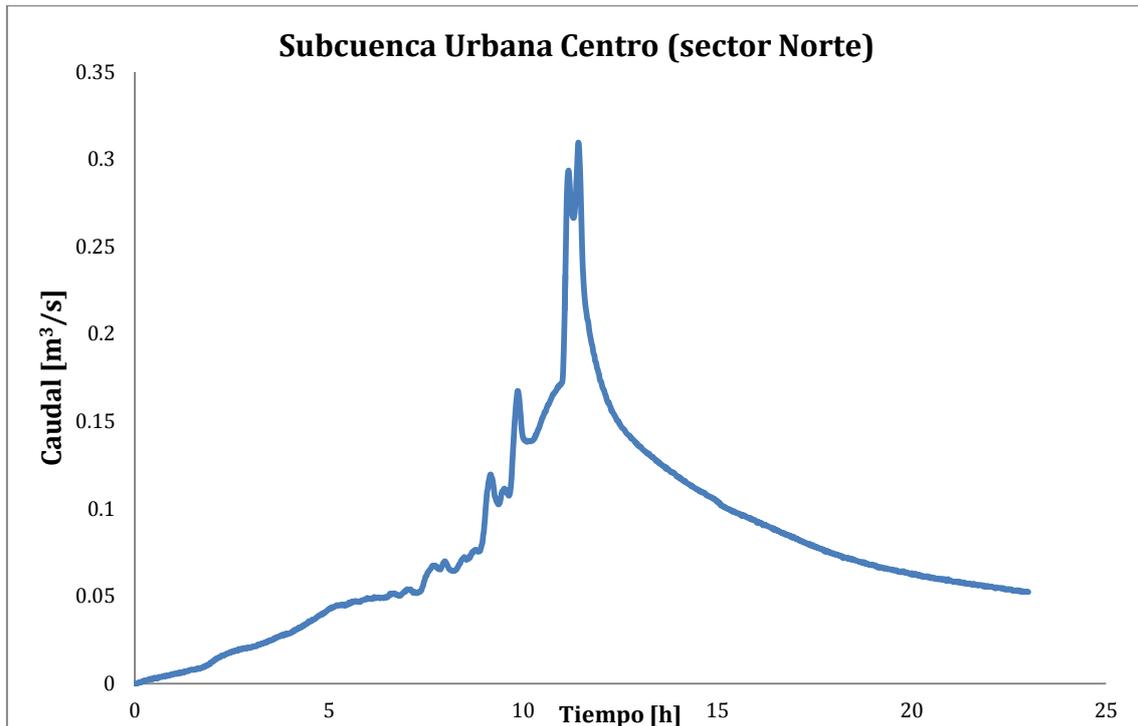


Figura 11-14 - Evento 5. Hidrograma de salida Río Cascavel, sector norte.

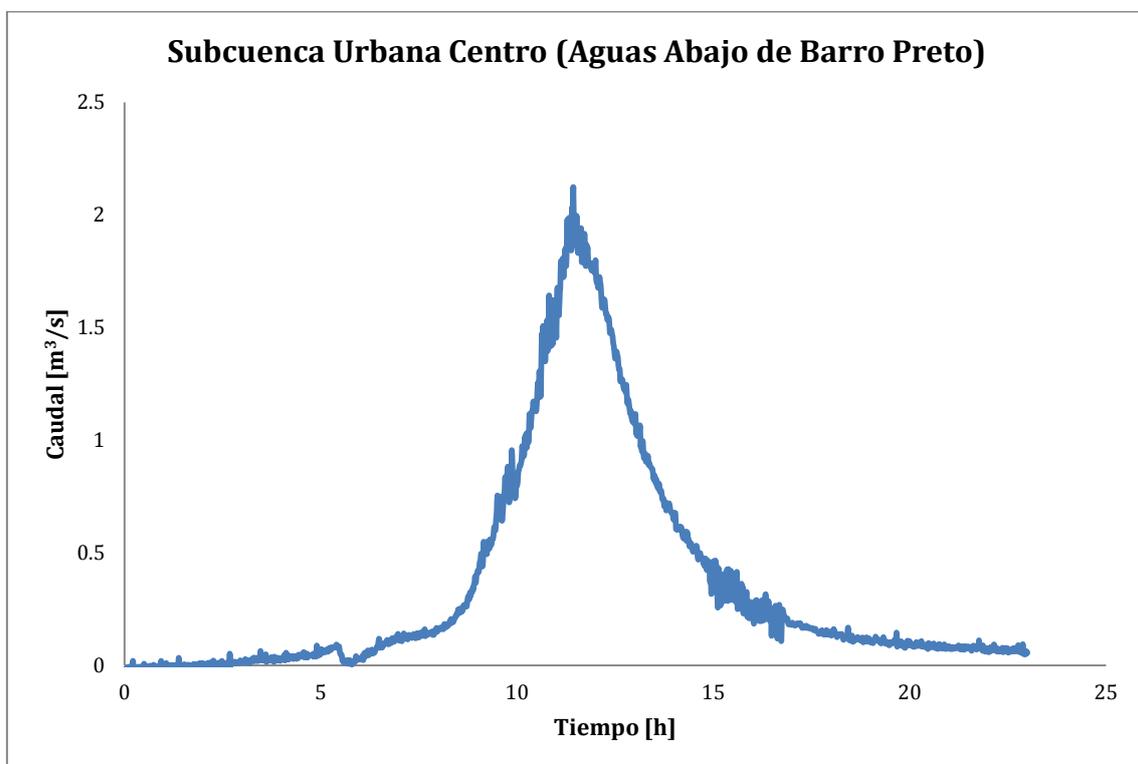


Figura 11-15 - Evento 5. Hidrograma de salida Río Cascavel, aguas abajo del Arroio Barro Preto.

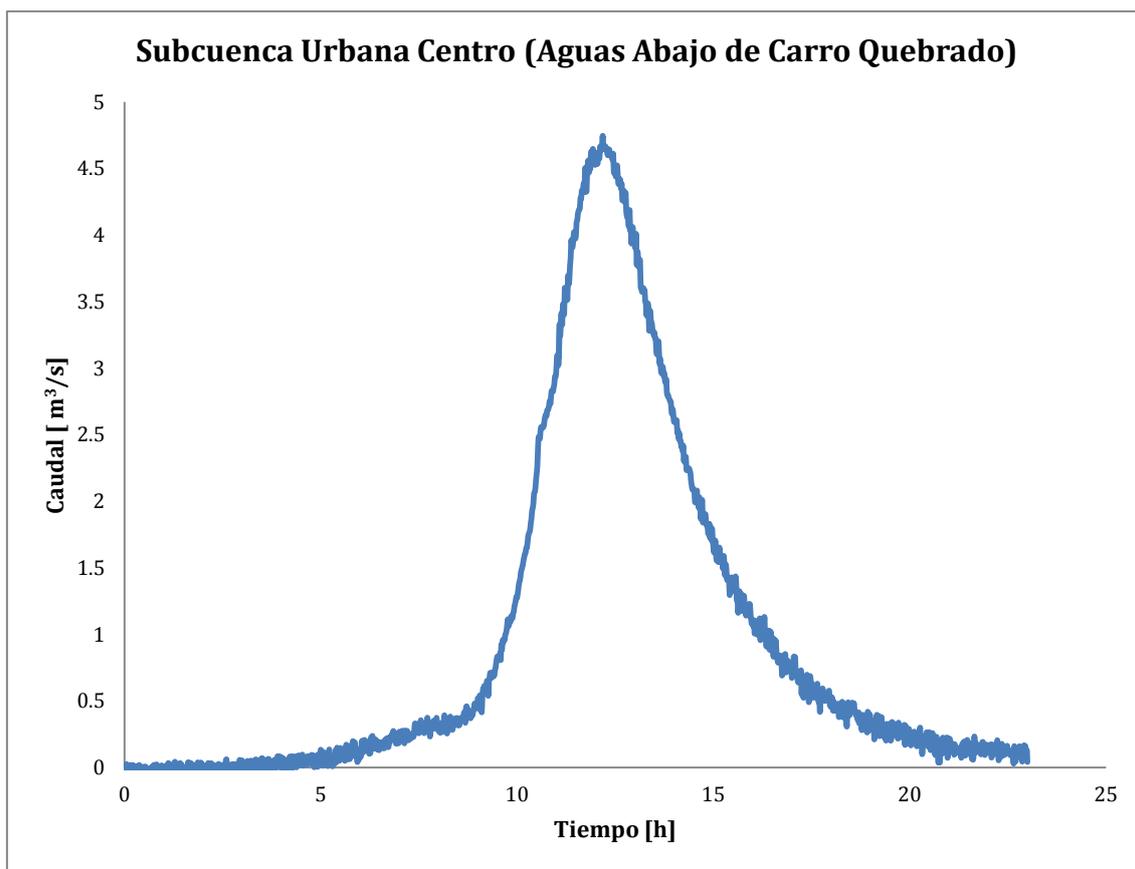


Figura 11-16 - Evento 5. Hidrograma de salida Río Cascavel, aguas abajo del Arroio Carro Quebrado.

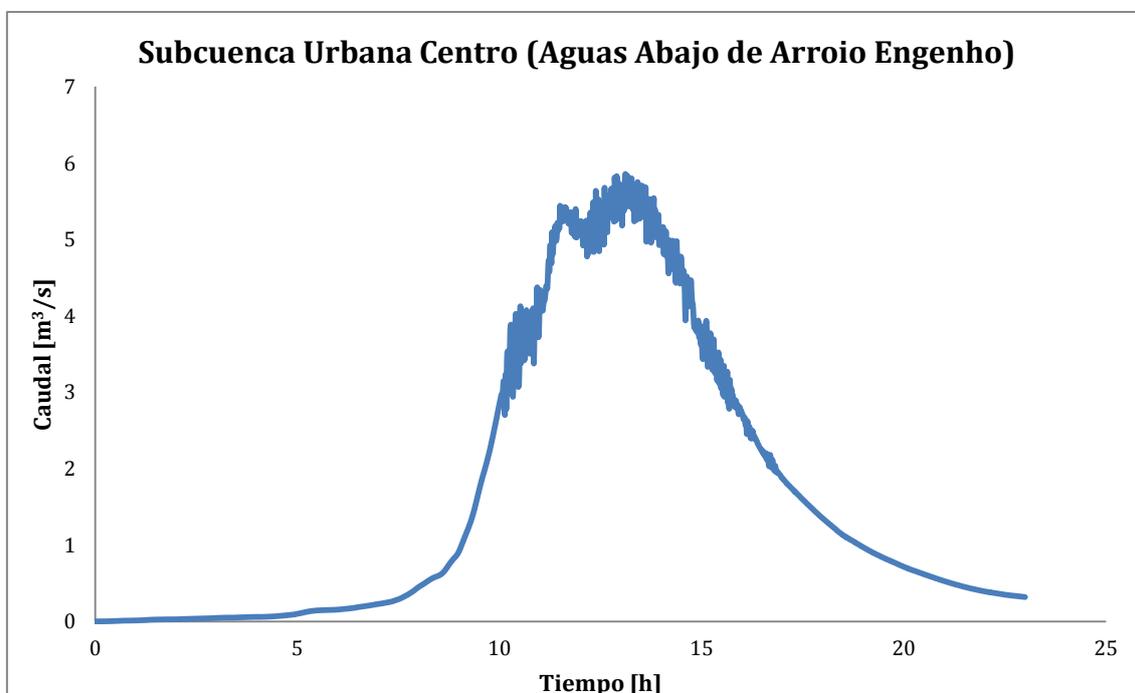


Figura 11-17 - Evento 5. Hidrograma de salida Río Cascavel, aguas abajo del Arroio Engenho.

11.3. Evento 6.

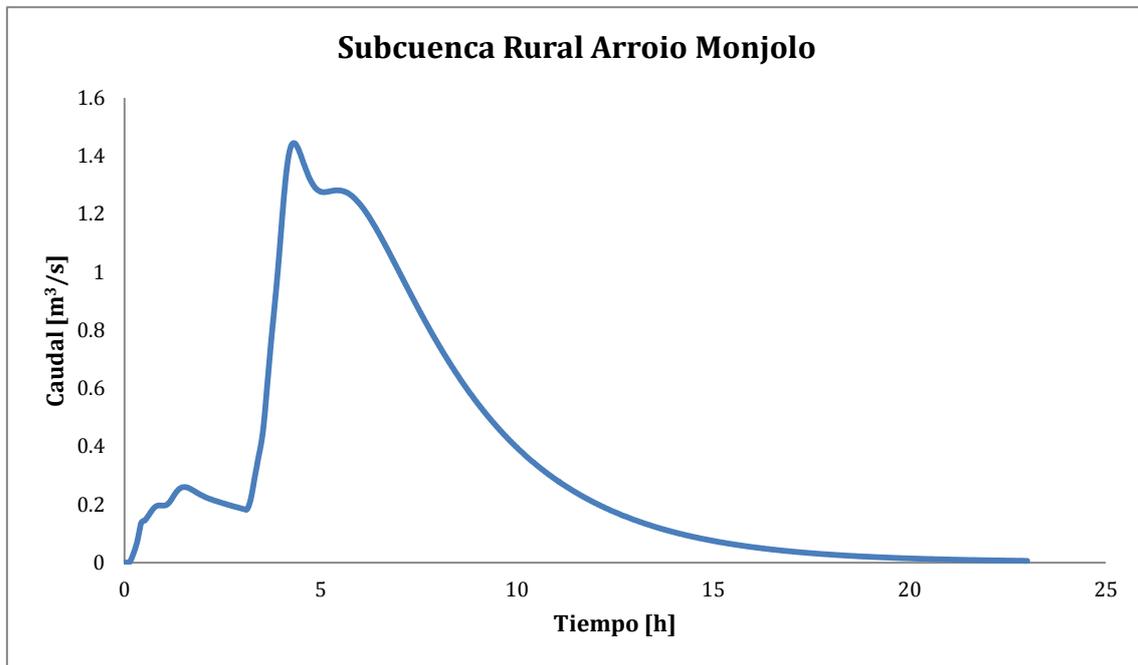


Figura 11-18 - Evento 6. Hidrograma de salida de subcuenca Arroio Monjolo.

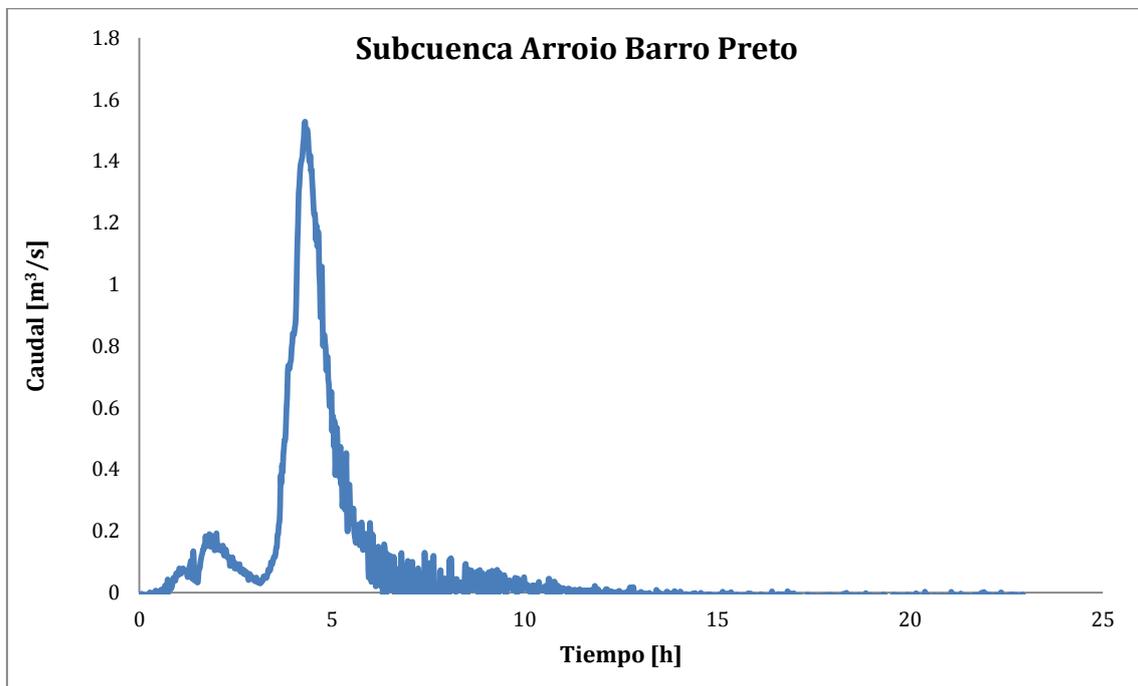


Figura 11-19 - Evento 6. Hidrograma de salida de subcuenca Arroio Barro Preto.

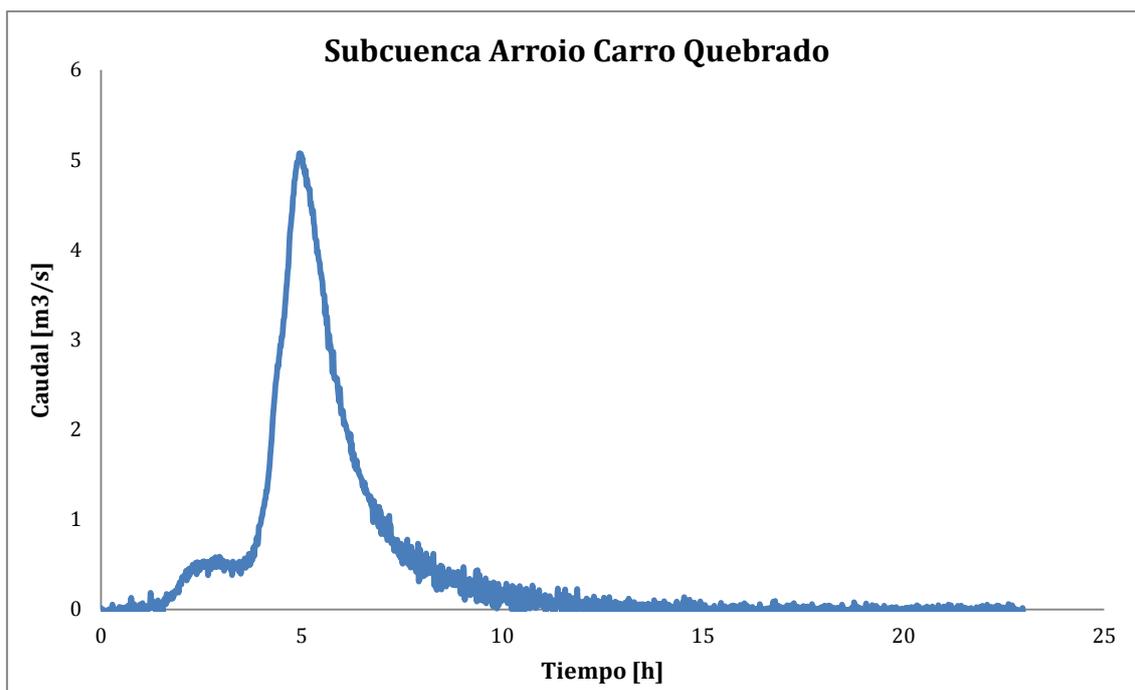


Figura 11-20 – Evento 6. Hidrograma de salida de subcuenca Arroio Carro Quebrado.

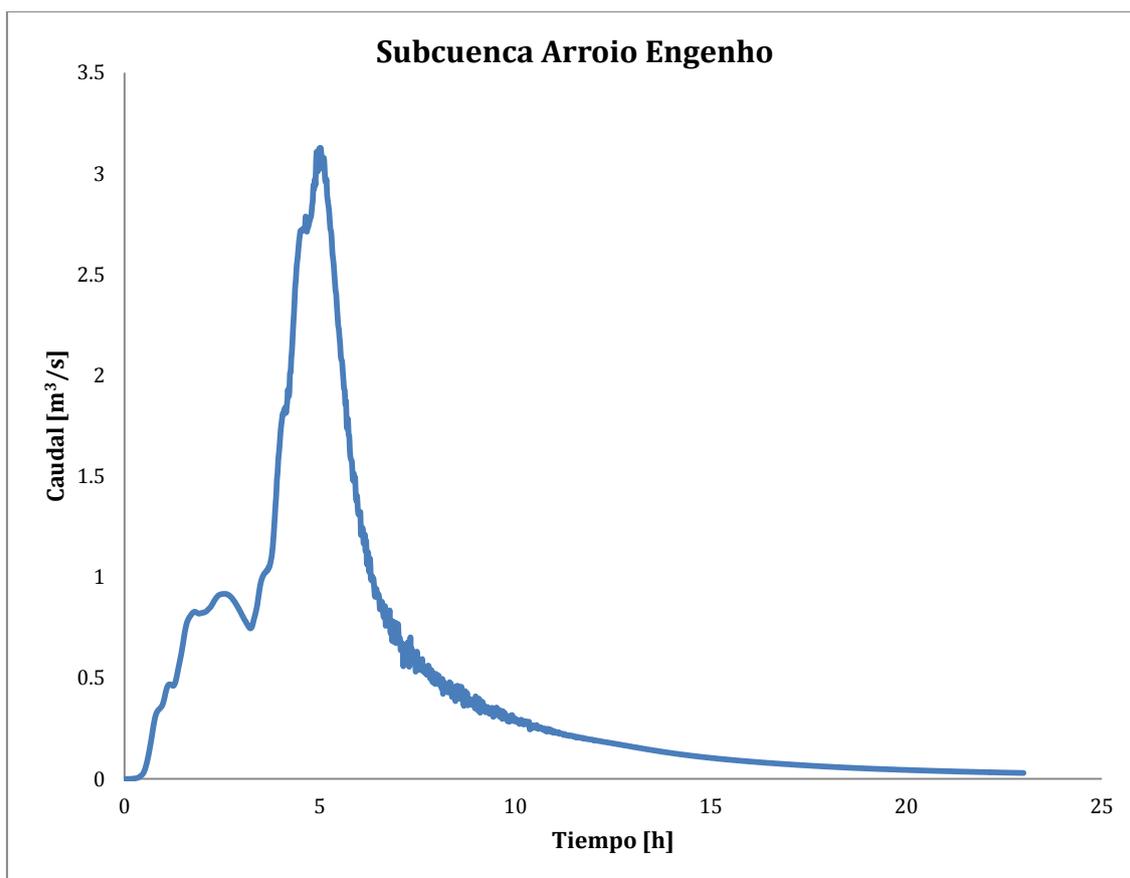


Figura 11-21 – Evento 6. Hidrograma de salida de subcuenca Arroio Engenho.

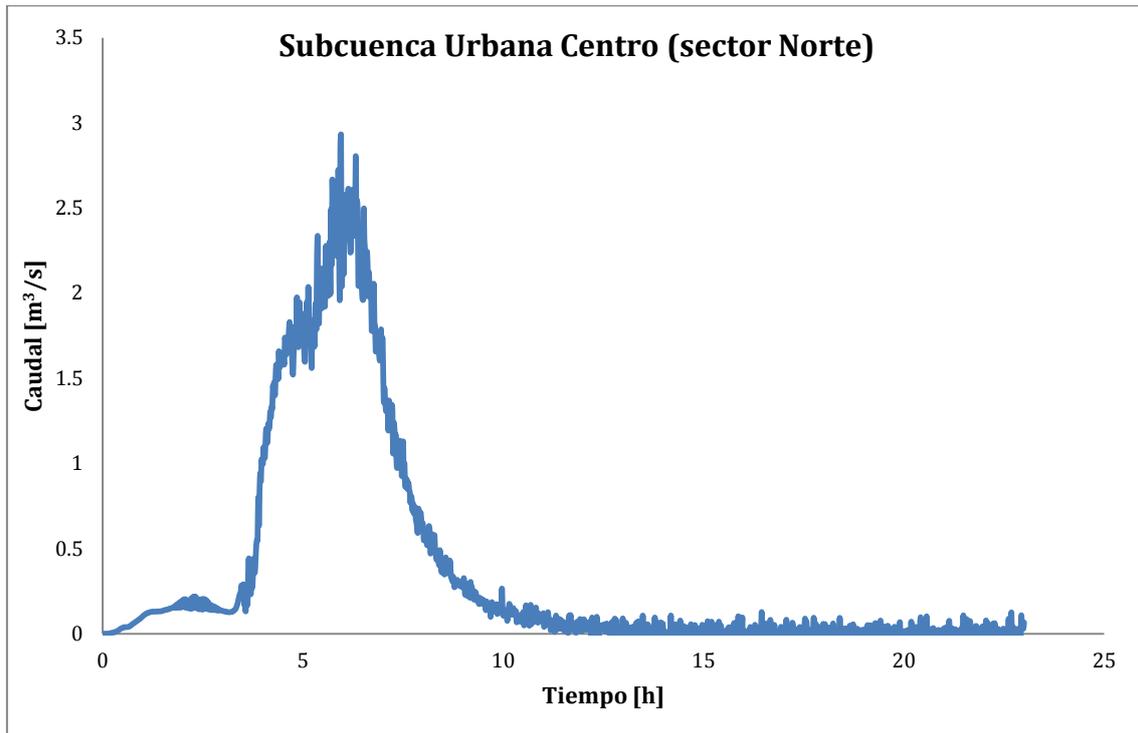


Figura 11-22 - Evento 6. Hidrograma de salida Río Cascavel, sector norte.

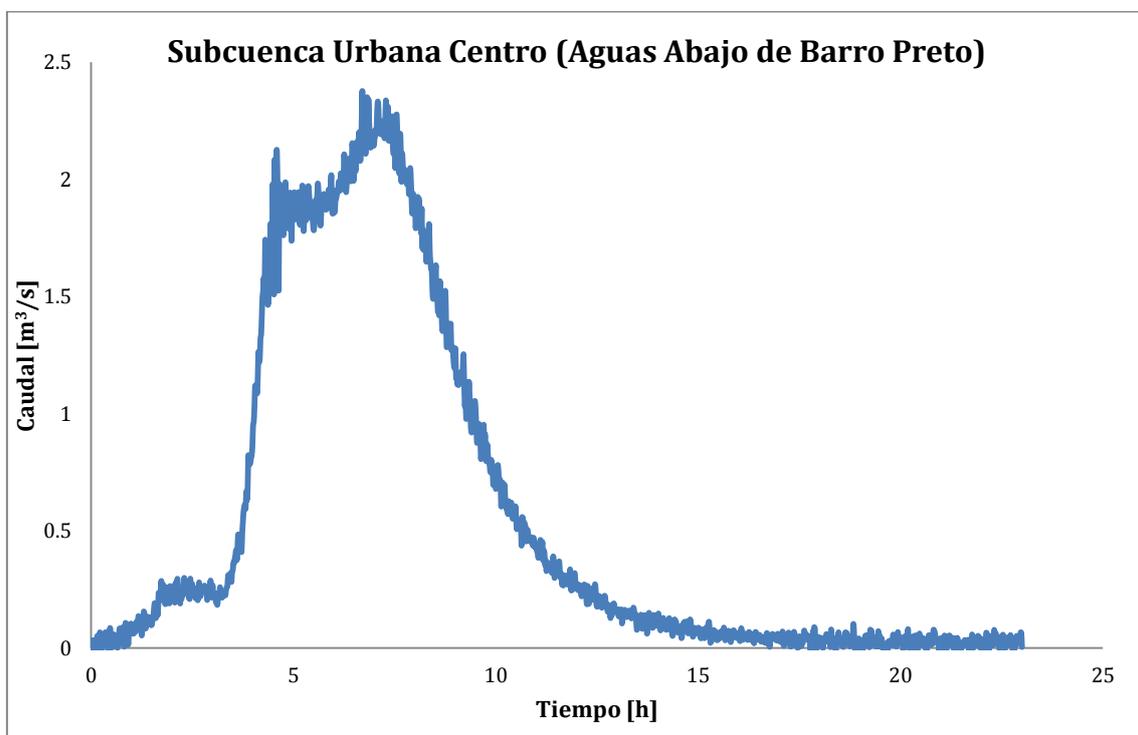


Figura 11-23 - Evento 6. Hidrograma de salida Río Cascavel, aguas abajo de Arroio Barro Preto.

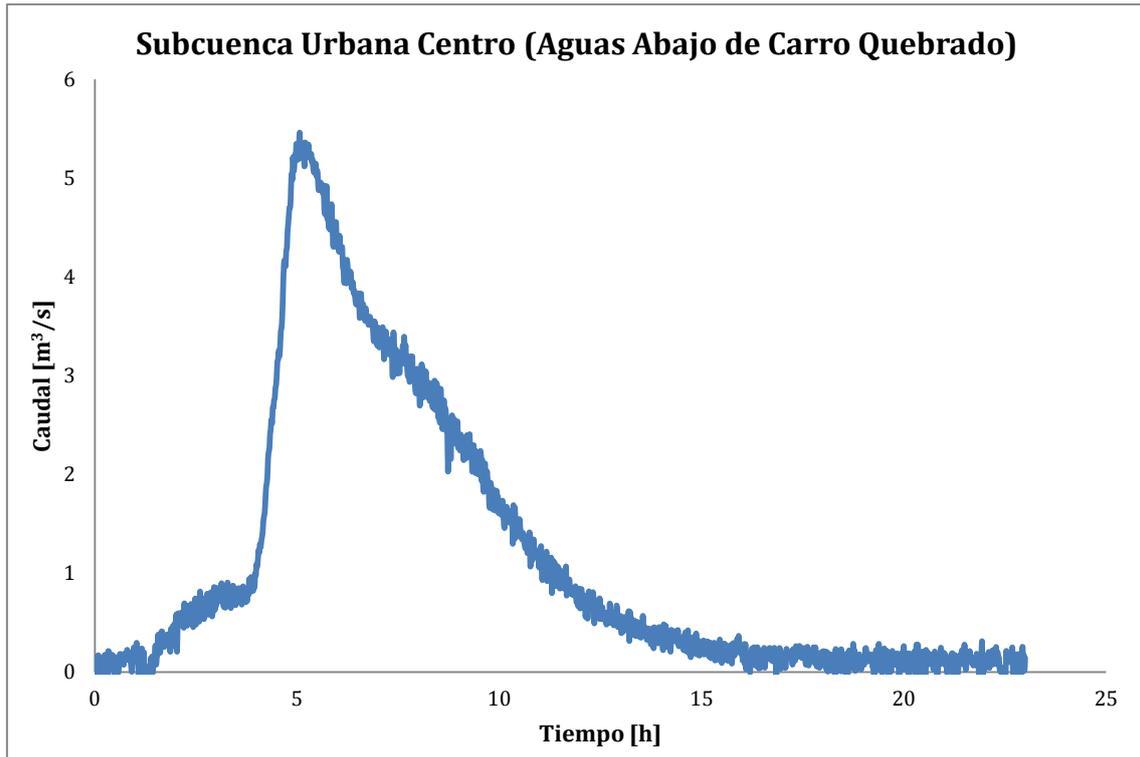


Figura 11-24 - Evento 6. Hidrograma de salida Río Cascavel, aguas abajo de Arroio Carro Quebrado.

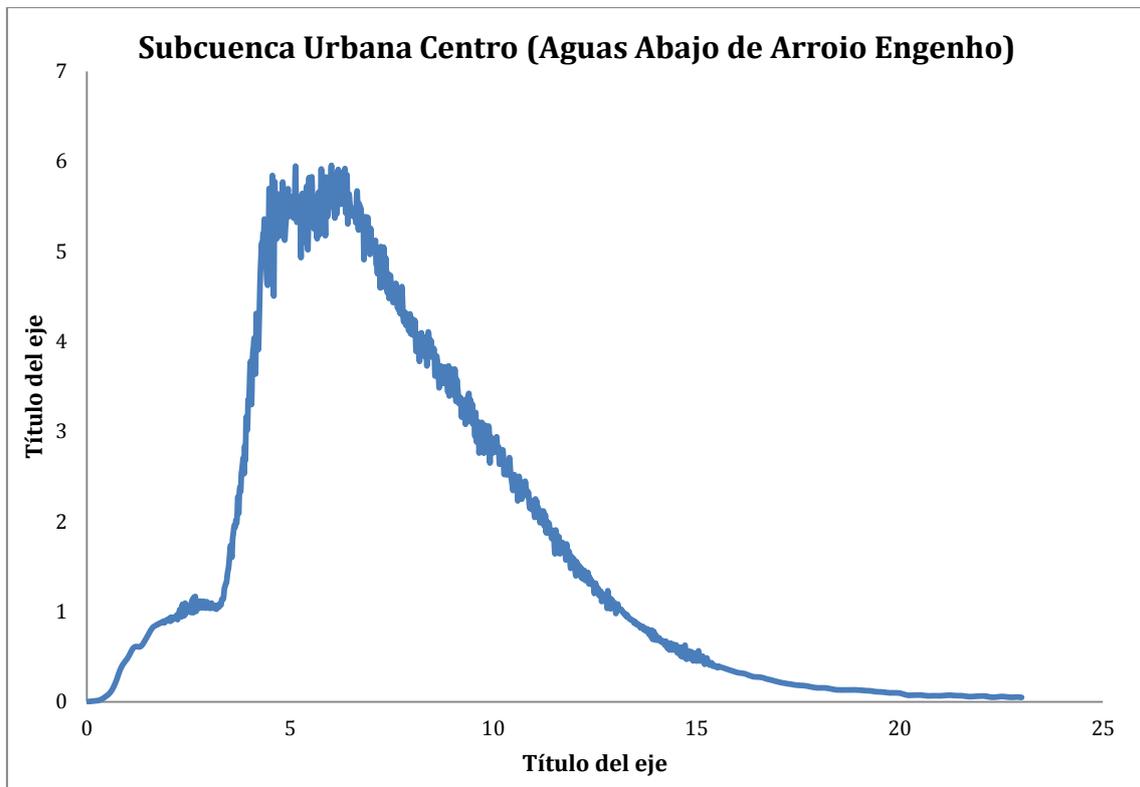


Figura 11-25 - Evento 6. Hidrograma de salida Río Cascavel, aguas abajo de Arroio Engenho.

11.4. Evento 8.

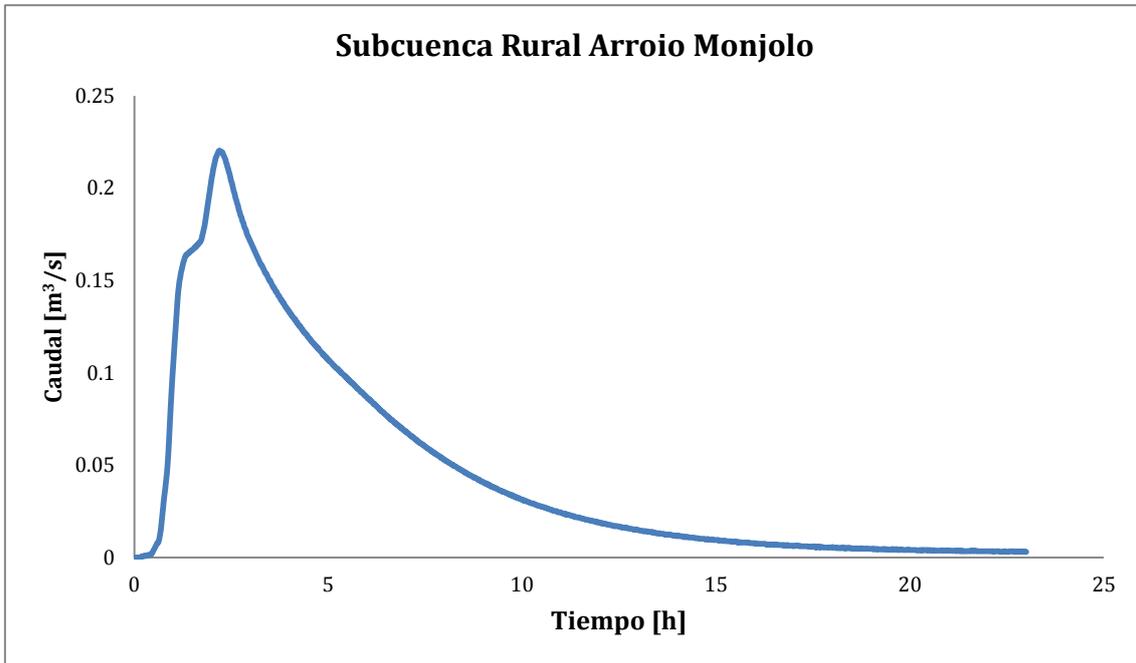


Figura 11-26 - Evento 8. Hidrograma de salida subcuenca Arroio Monjolo.

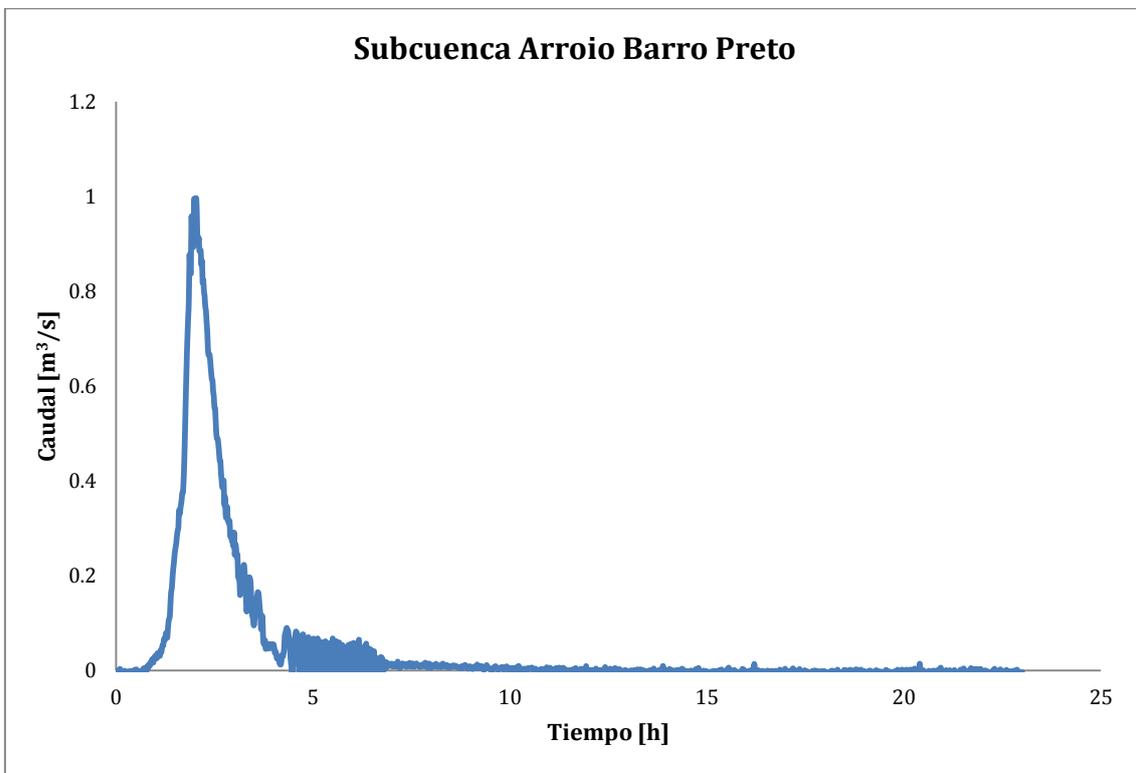


Figura 11-27 - Evento 8. Hidrograma de salida subcuenca Arroio Barro Preto.

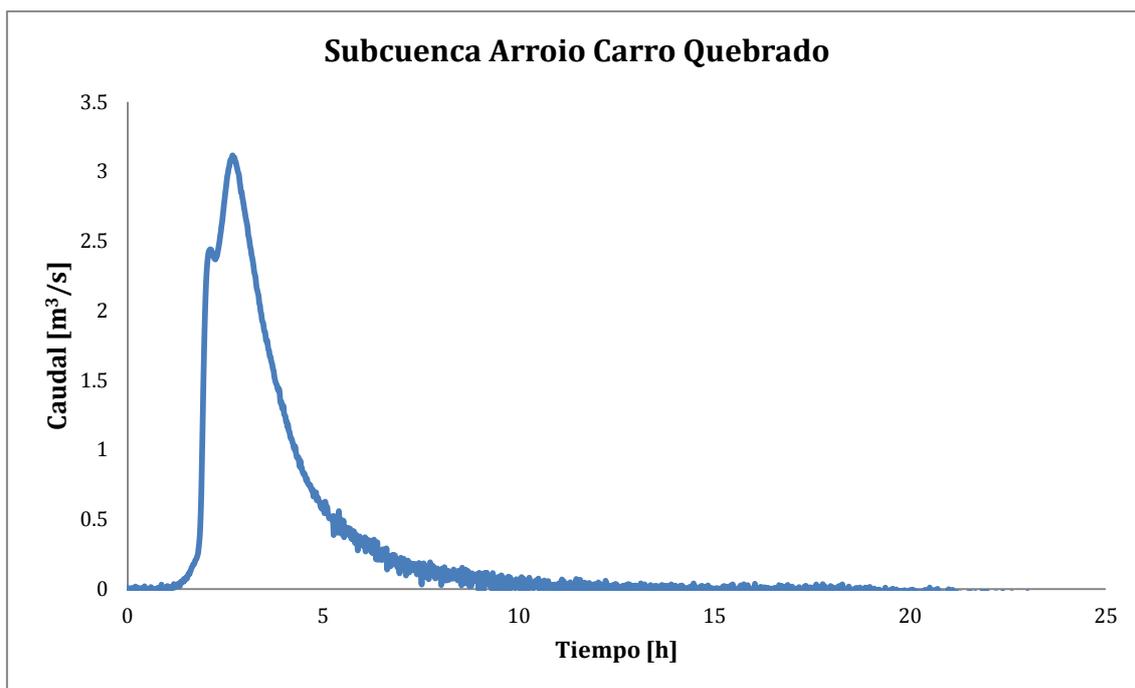


Figura 11-28 – Evento 8. Hidrograma de salida subcuenca Arroio Carro Quebrado.

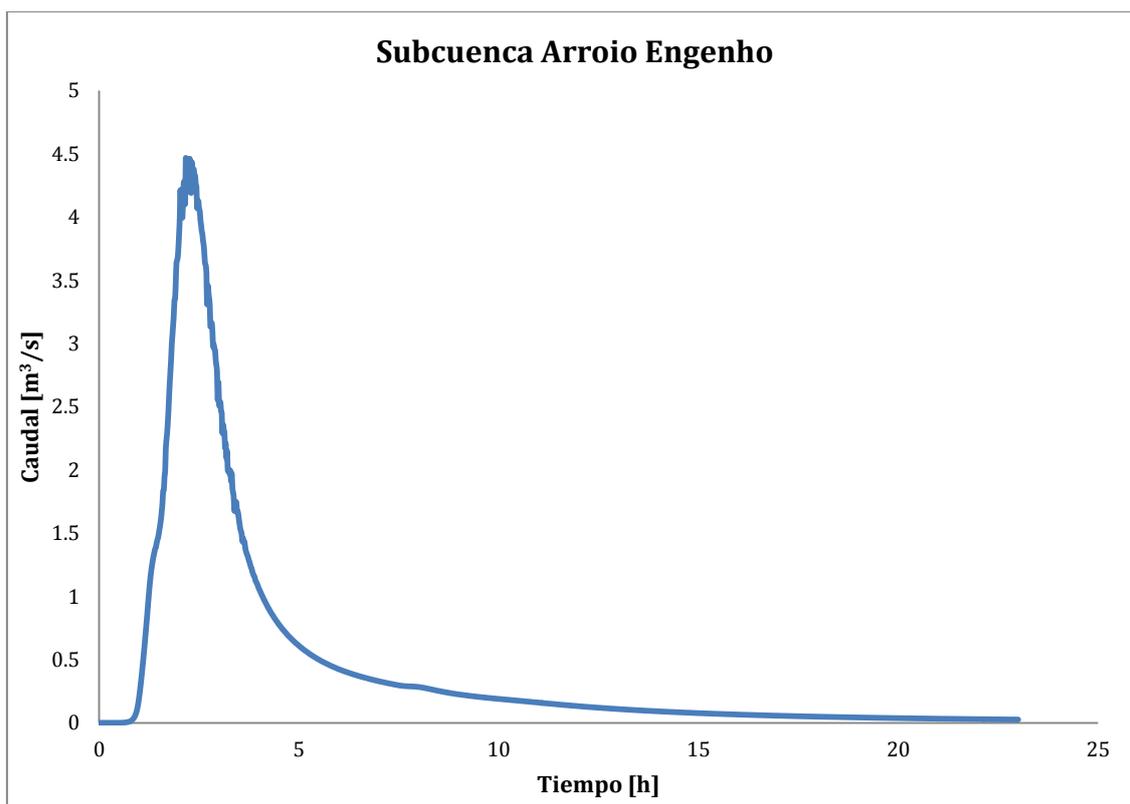


Figura 11-29 – Evento 8. Hidrograma de salida subcuenca Arroio Engenho.

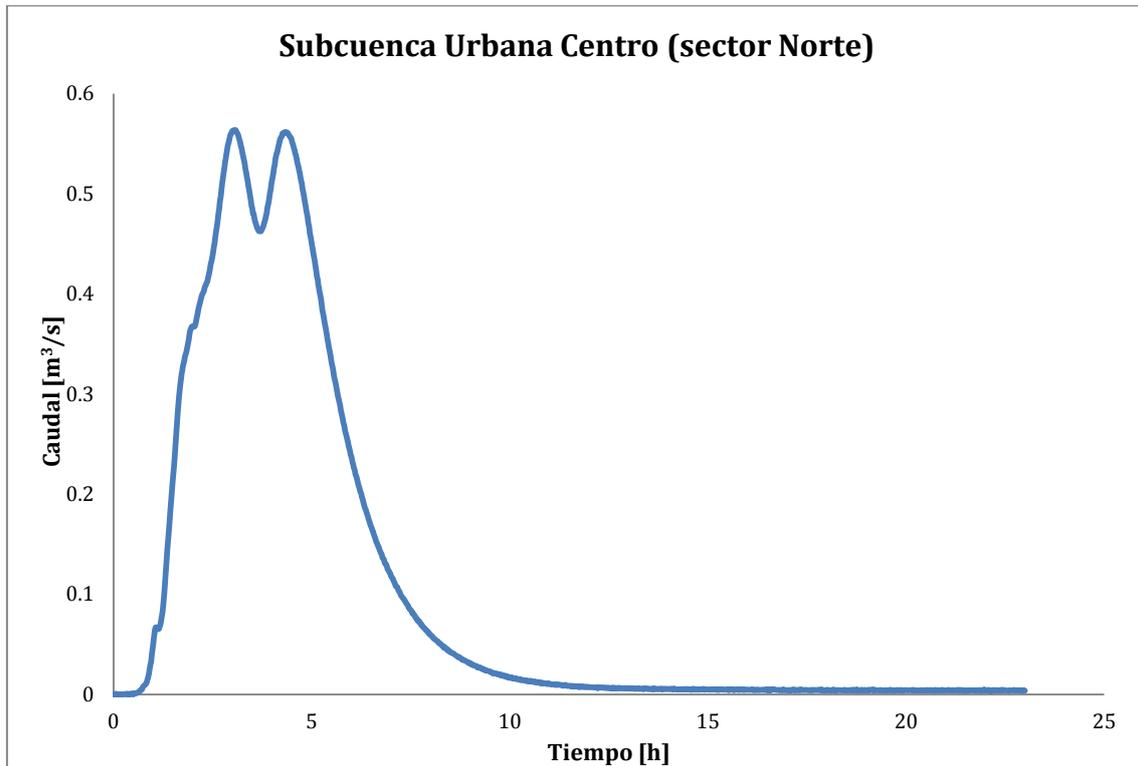


Figura 11-30 - Evento 8. Hidrograma de salida Río Cascavel, sector Norte.

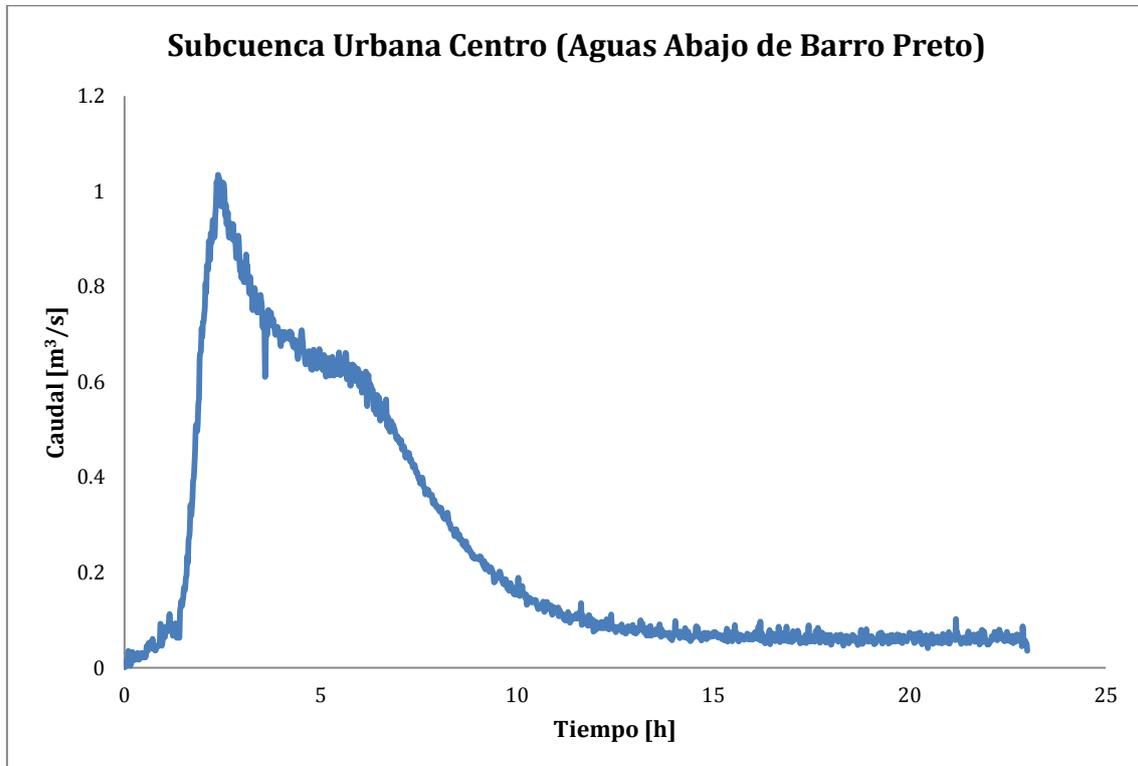


Figura 11-31 - Evento 8. Hidrograma de salida Río Cascavel, aguas abajo de Arroio Barro Preto.

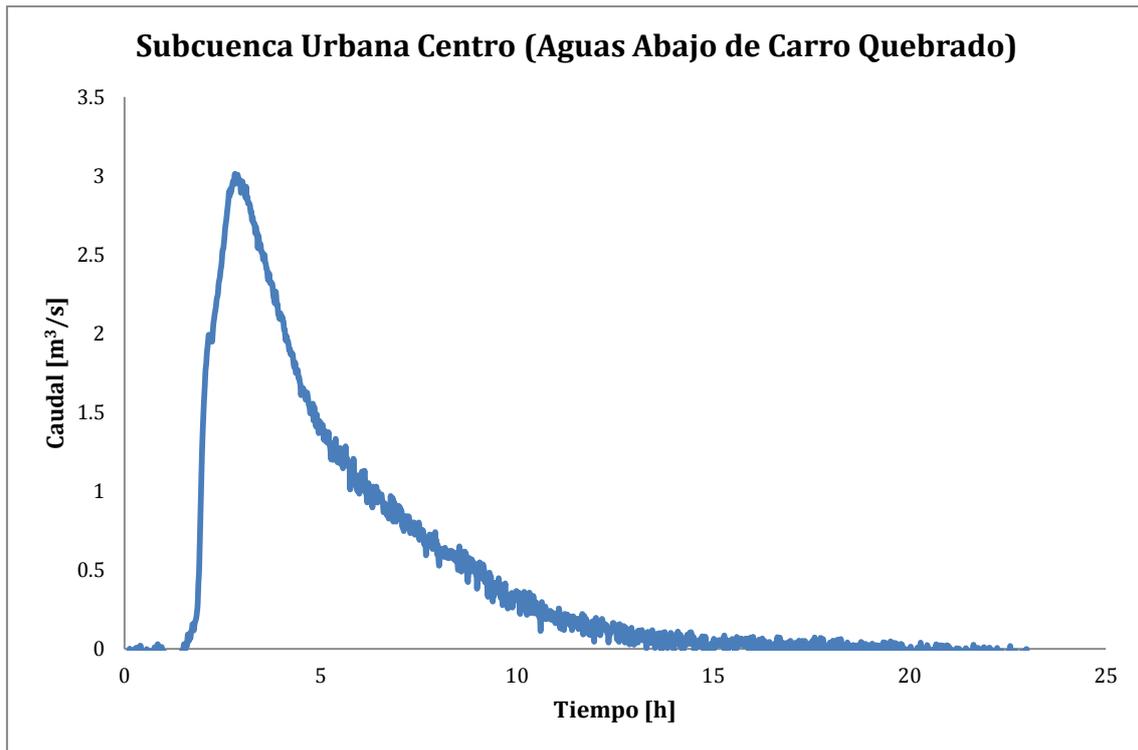


Figura 11-32 – Evento 8. Hidrograma de salida Río Cascavel, aguas abajo de Arroio Quebrado.

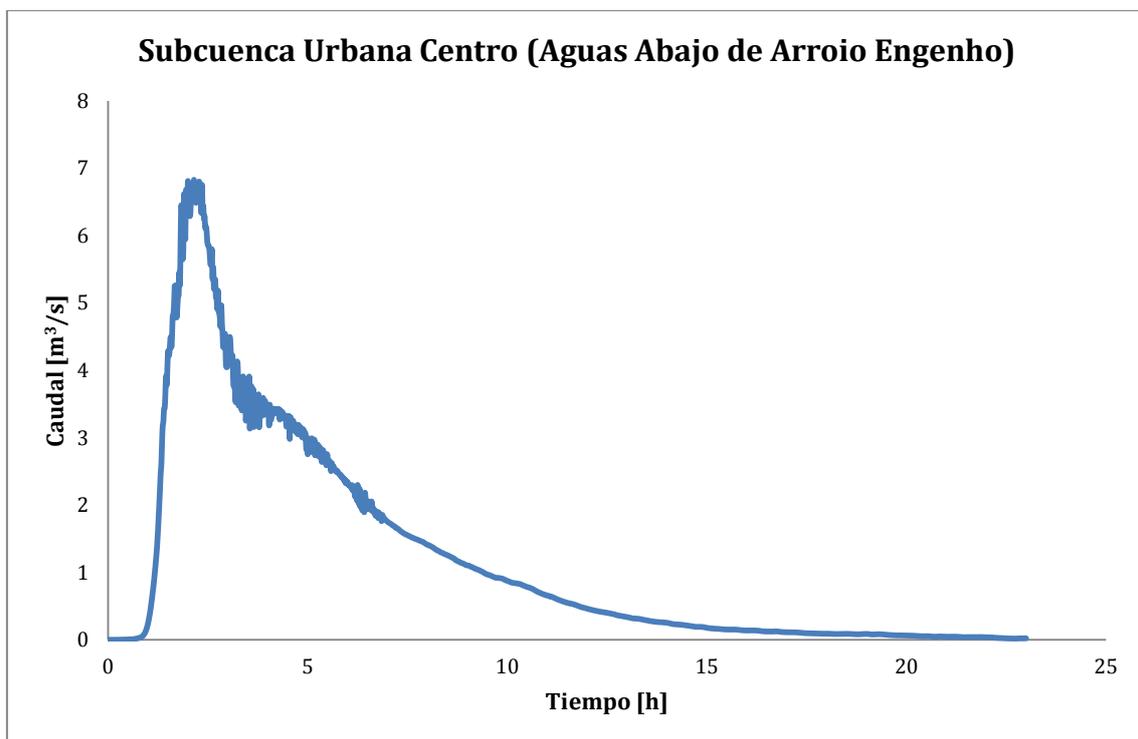


Figura 11-33 – Evento 8. Hidrograma de salida Río Cascavel, aguas abajo de Arroio Engenho.

11.5. Evento 9.

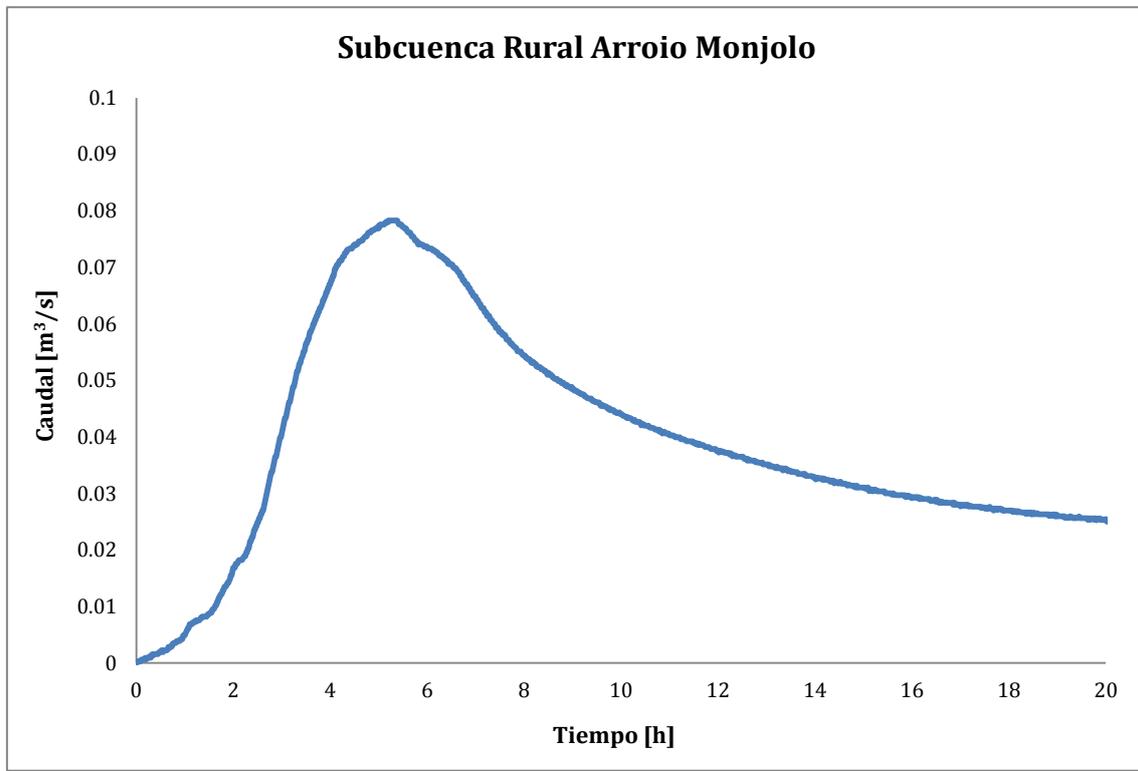


Figura 11-34 - Evento 9. Hidrograma de salida subcuenca Arroio Monjolo.

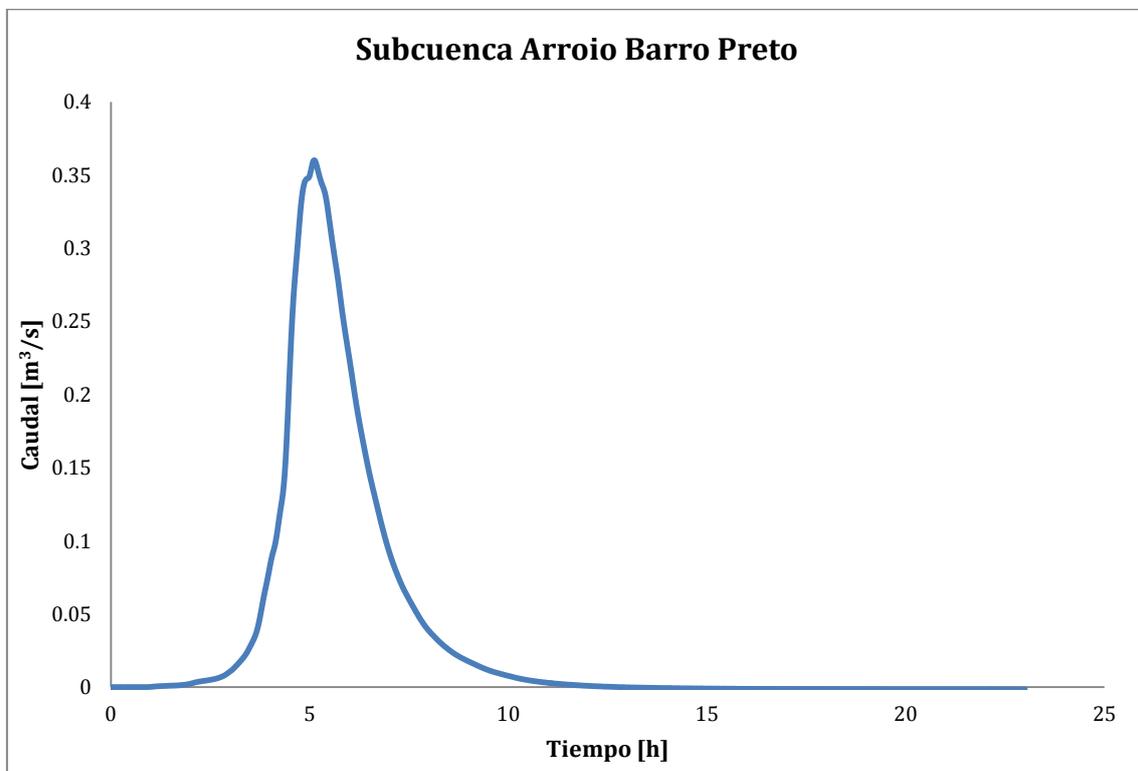


Figura 11-35 – Evento 9. Hidrograma de salida subcuenca Arroio Barro Preto.

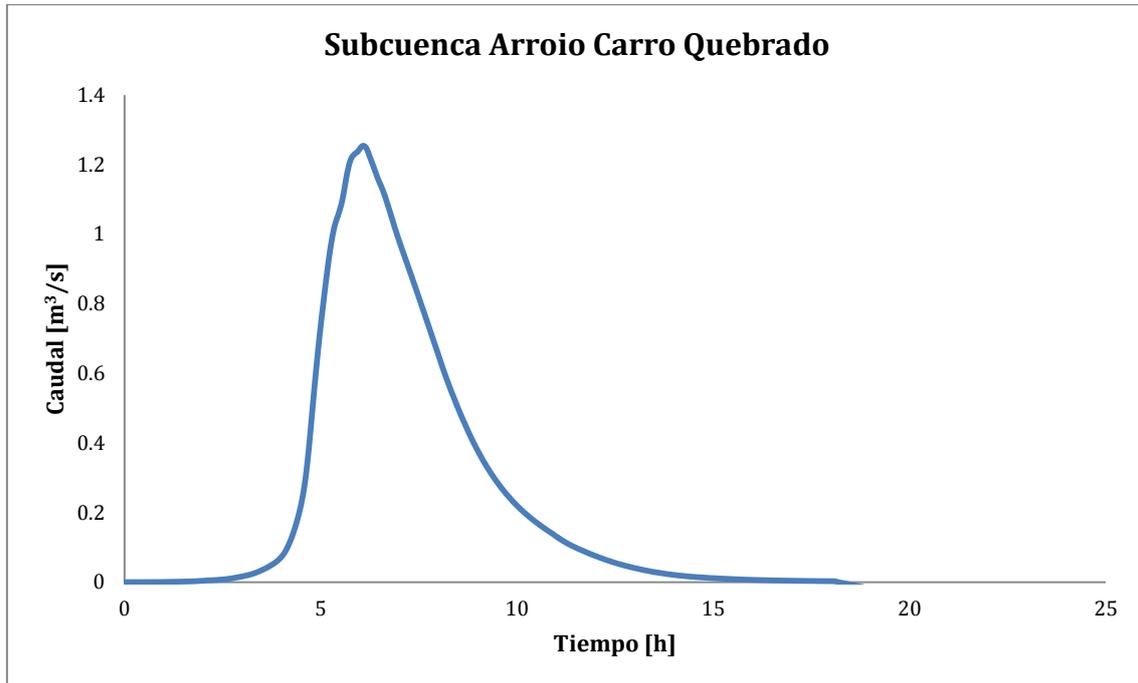


Figura 11-36 – Evento 9. Hidrograma de salida subcuenca Arroio Carro Quebrado.

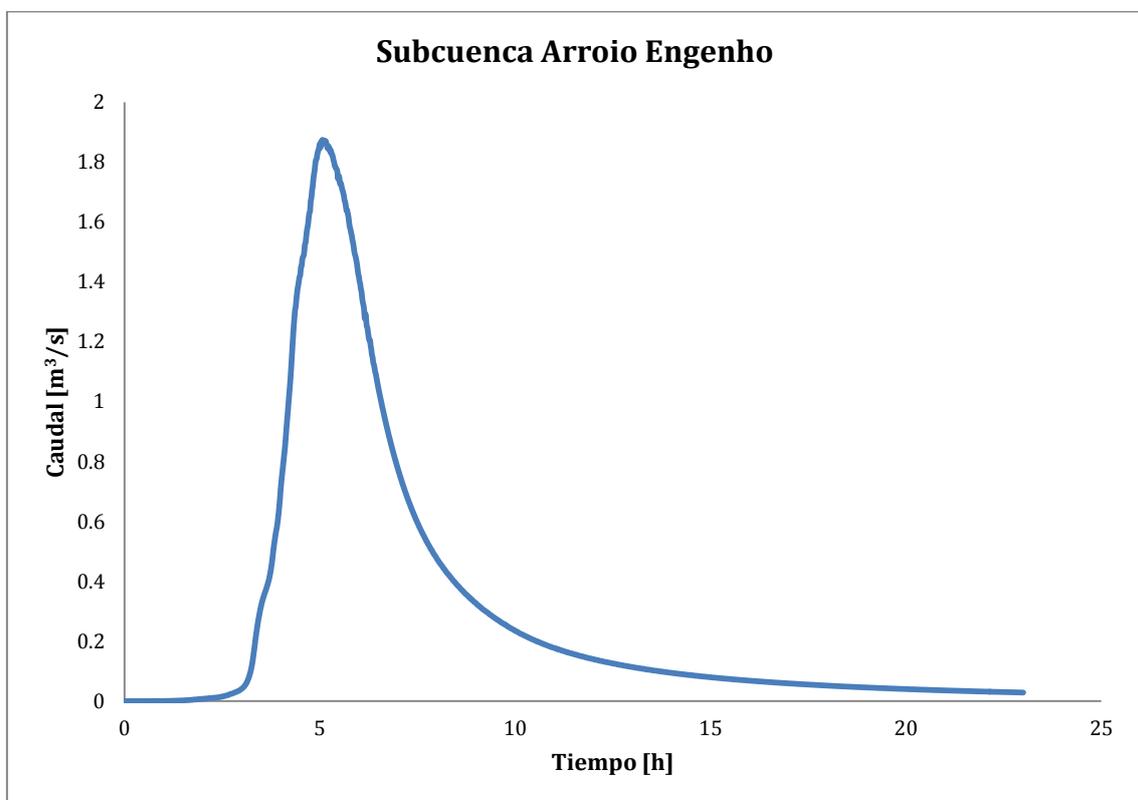


Figura 11-37 – Evento 9. Hidrograma de salida subcuenca Arroio Engenho.

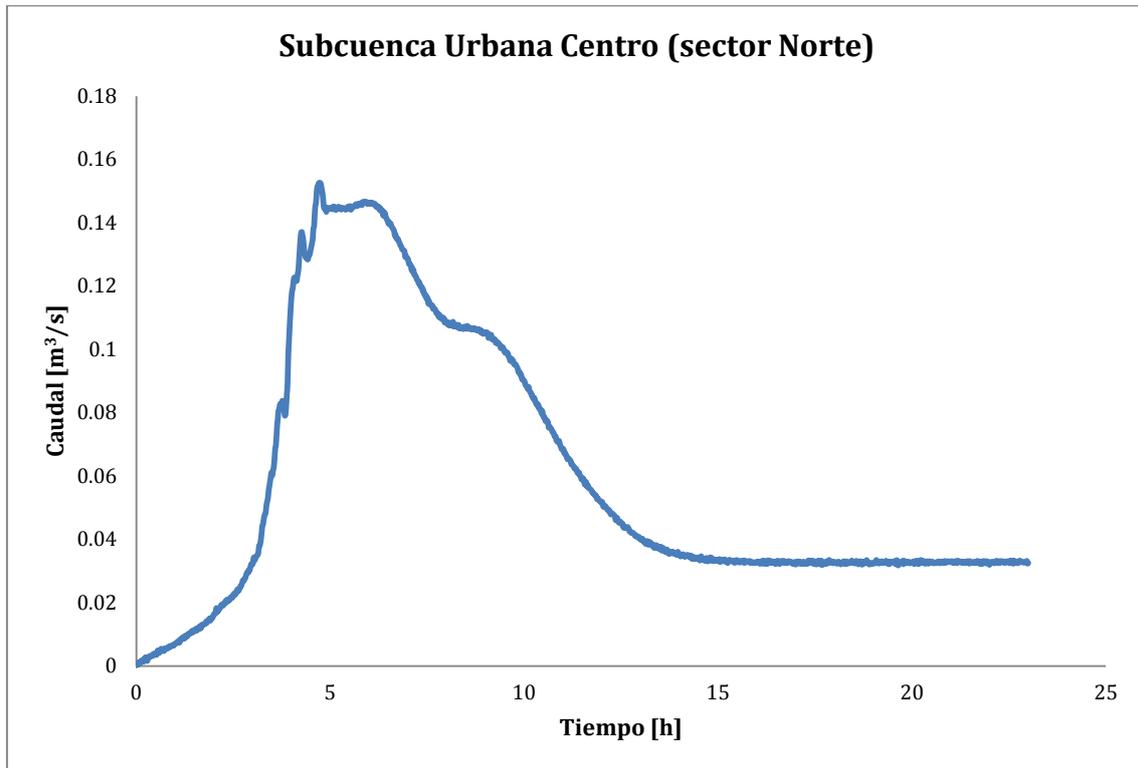


Figura 11-38 - Evento 9. Hidrograma de salida Río Cascavel, sector Norte.

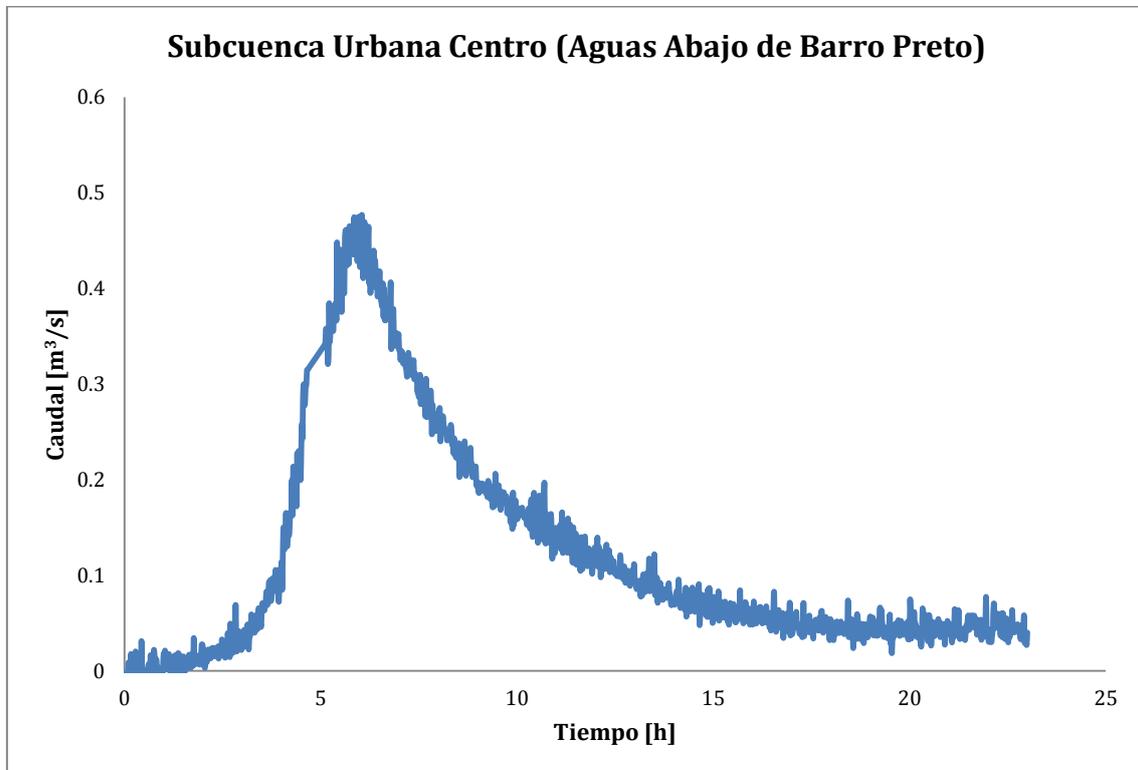


Figura 11-39 - Evento 9. Hidrograma de salida Río Cascavel, aguas abajo del Arroio Barro Preto.

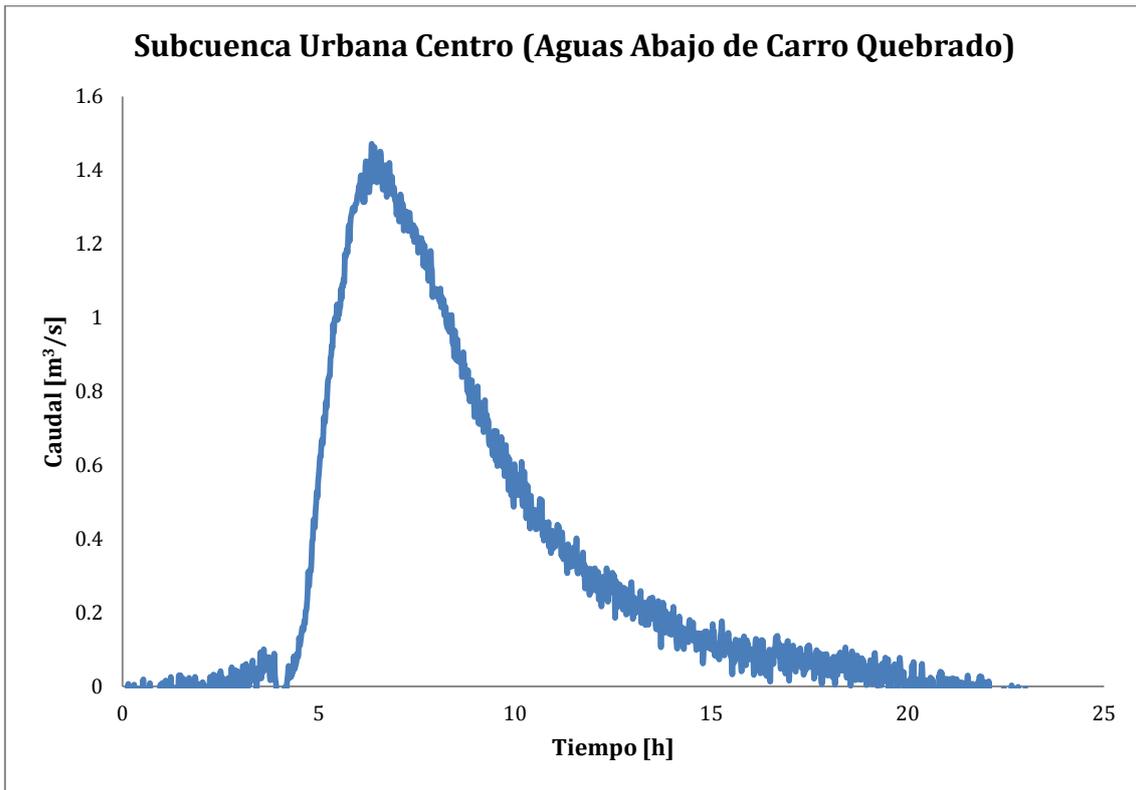


Figura 11-40 – Evento 9. Hidrograma de salida Río Cascavel, aguas abajo del Arroio Carro Quebrado.

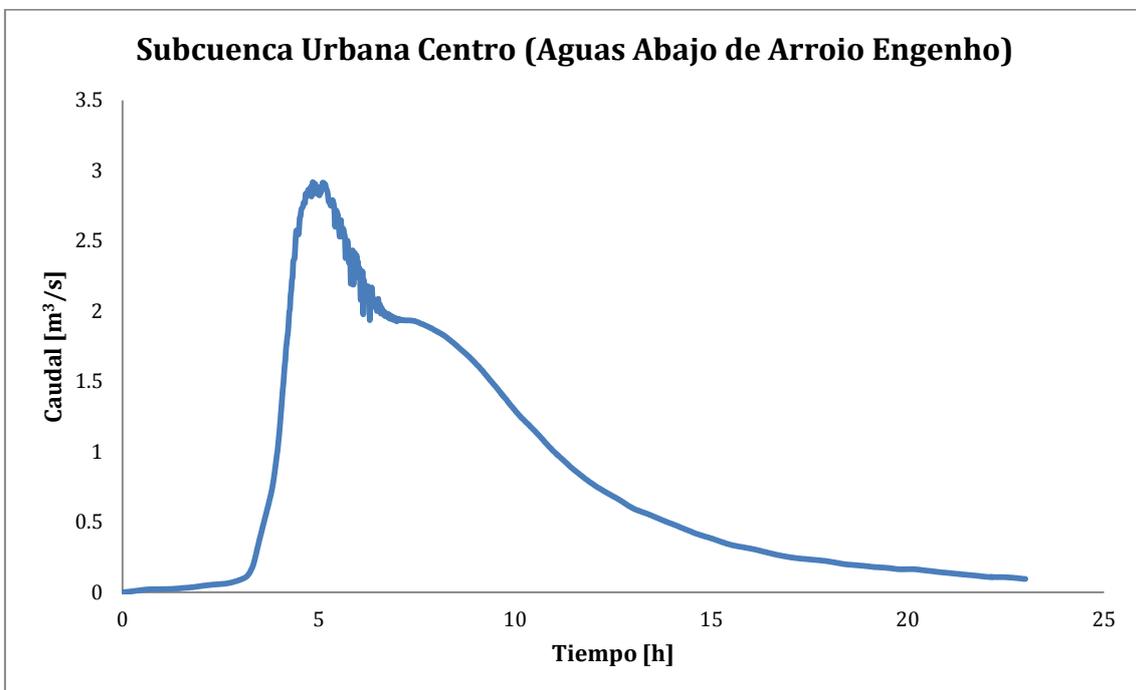


Figura 11-41 – Evento 9. Hidrograma de salida Río Cascavel, aguas abajo del Arroio Engenho.

11.6. Evento 10.

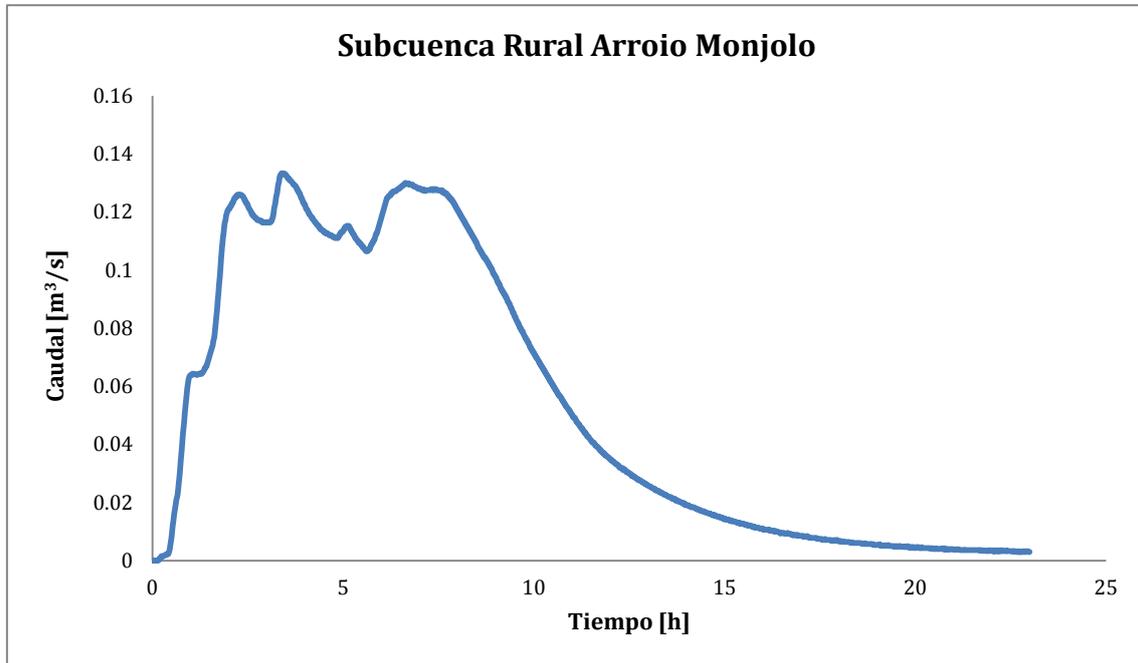


Figura 11-42 - Evento 10. Hidrograma de salida subcuenca Arroio Monjolo.

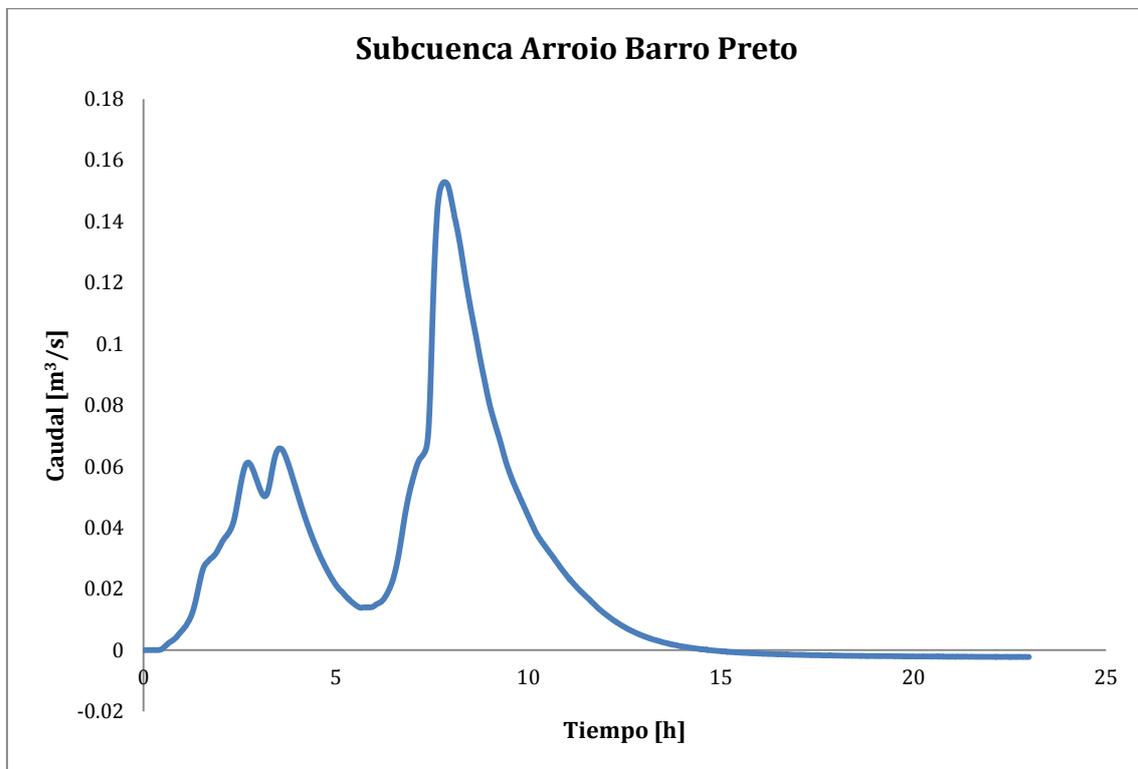


Figura 11-43 - Evento 10. Hidrograma de salida subcuenca Arroio Barro Preto.

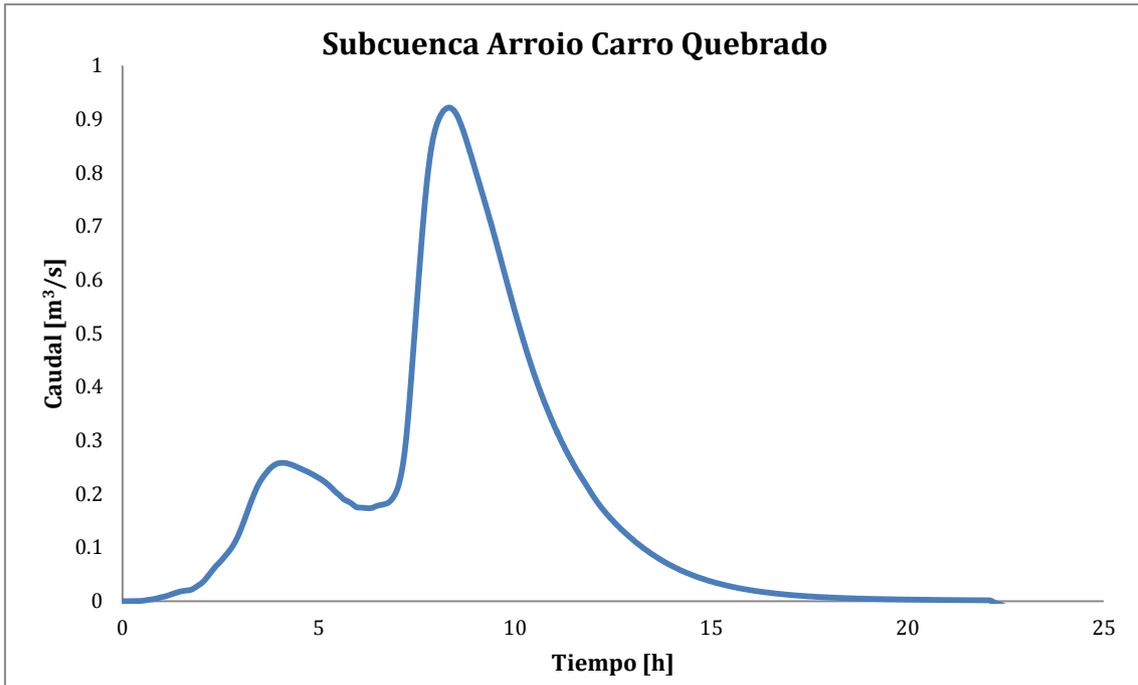


Figura 11-44 – Evento 10. Hidrograma de salida subcuenca Arroio Carro Quebrado.

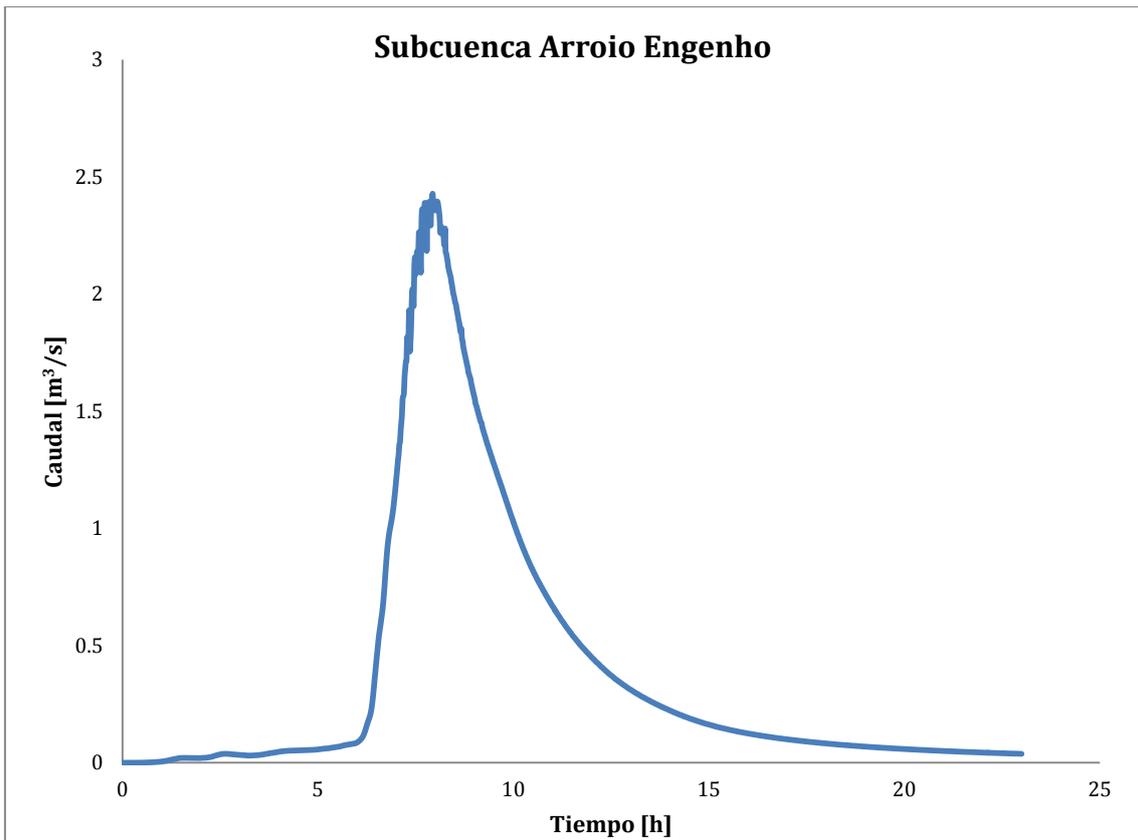


Figura 11-45 – Evento 10. Hidrograma de salida subcuenca Arroio Engenho.

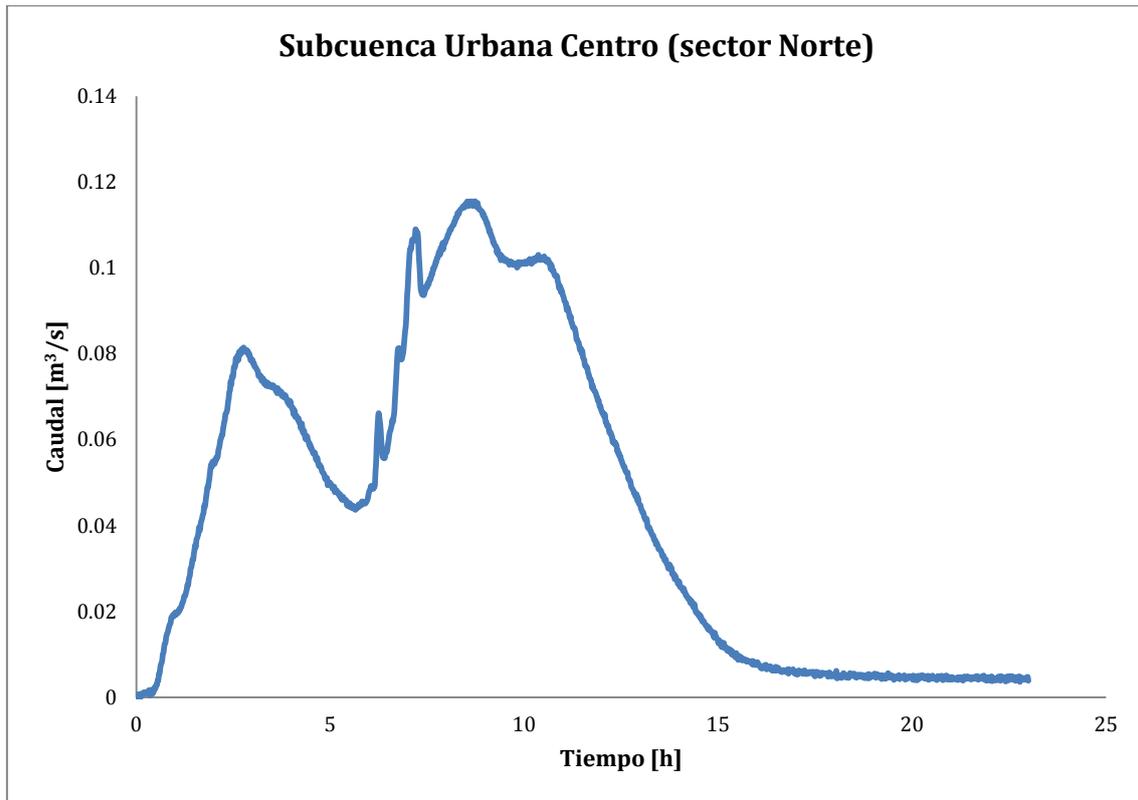


Figura 11-46 – Evento 10. Hidrograma de salida Río Cascavel, sector Norte.

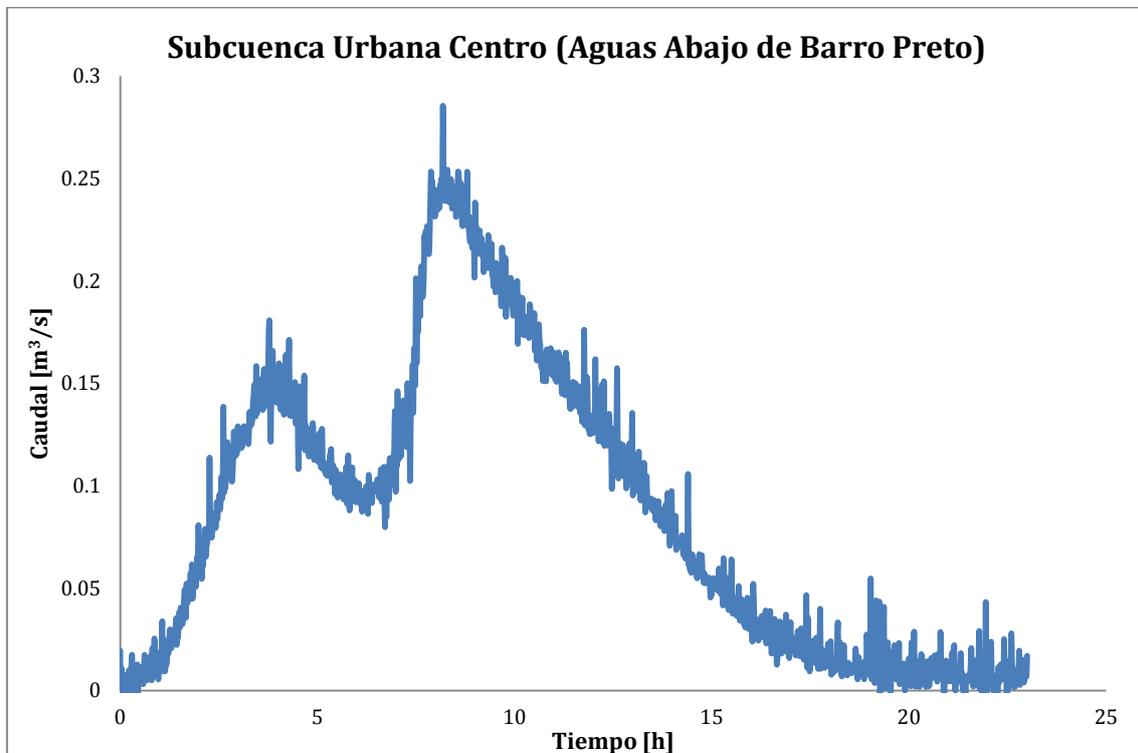


Figura 11-47 – Evento 10. Hidrograma de salida Río Cascavel, aguas abajo de Arroio Barro Preto.

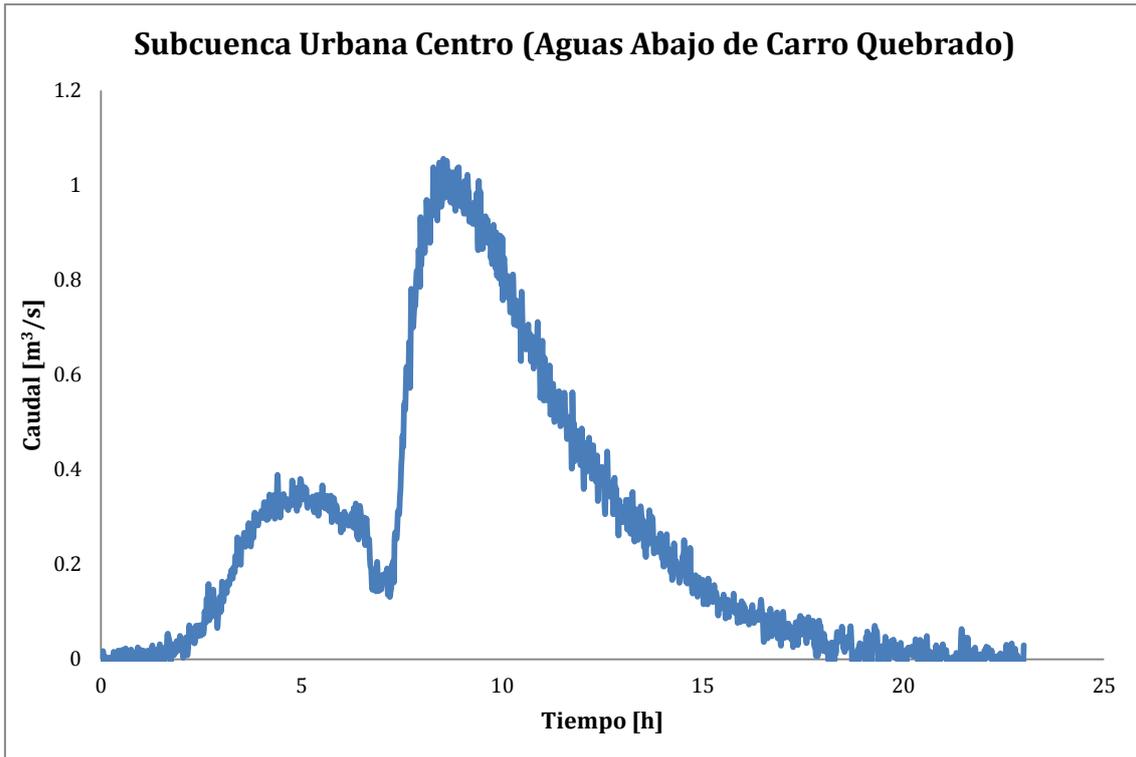


Figura 11-48 – Evento 10. Hidrograma de salida Río Cascavel, aguas abajo de Arroio Carro Quebrado.

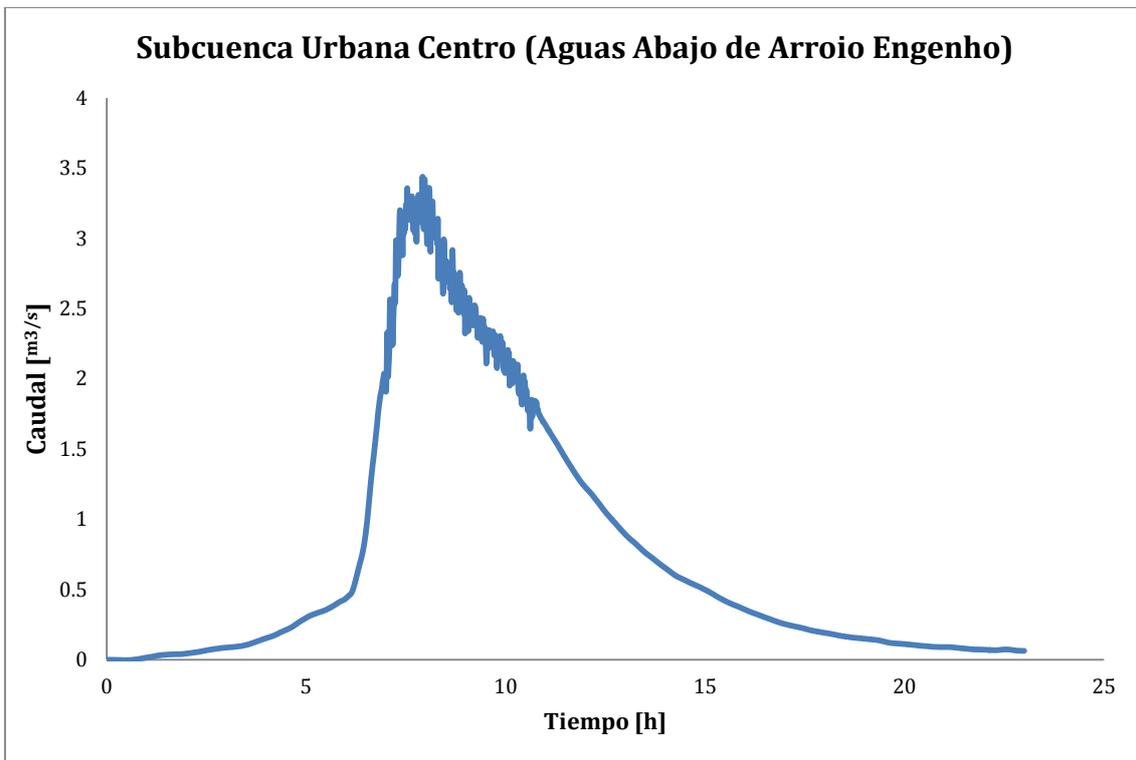


Figura 11-49 – Evento 10. Hidrograma de salida Río Cascavel, aguas abajo de Arroio Engenho.

11.7. Evento 11.

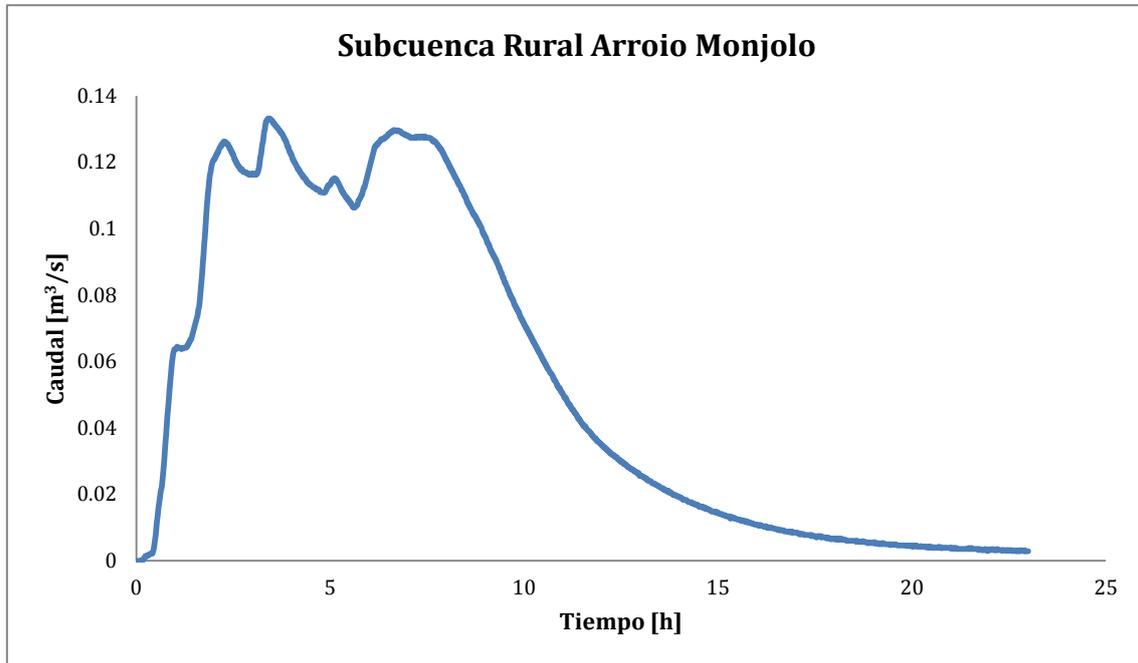


Figura 11-50 - Evento 11. Hidrograma de salida subcuenca Arroio Monjolo.

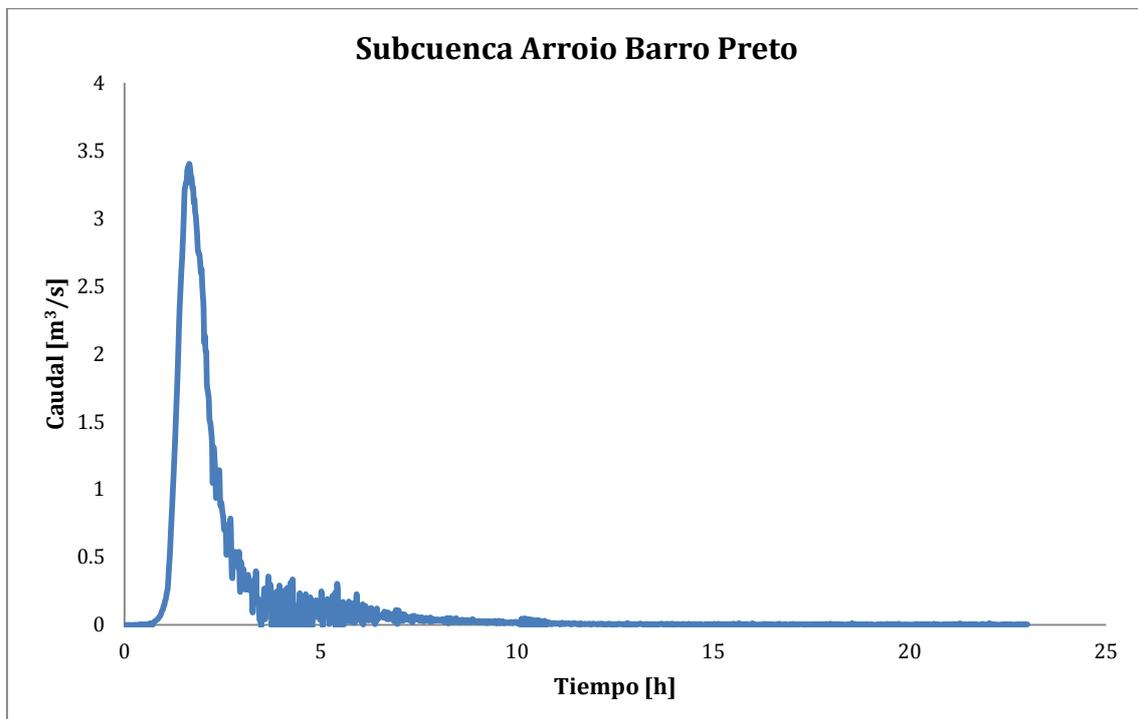


Figura 11-51 - Evento 11. Hidrograma de salida subcuenca Arroio Barro Preto.

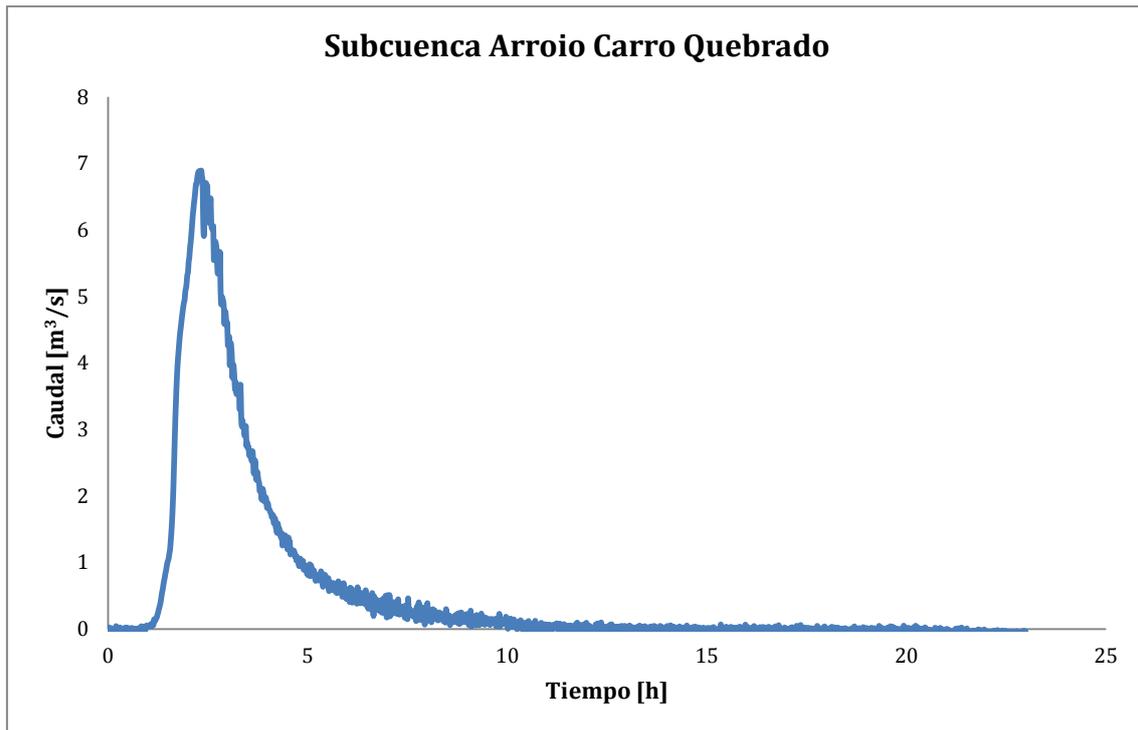


Figura 11-52 – Evento 11. Hidrograma de salida subcuenca Arroio Carro Quebrado.

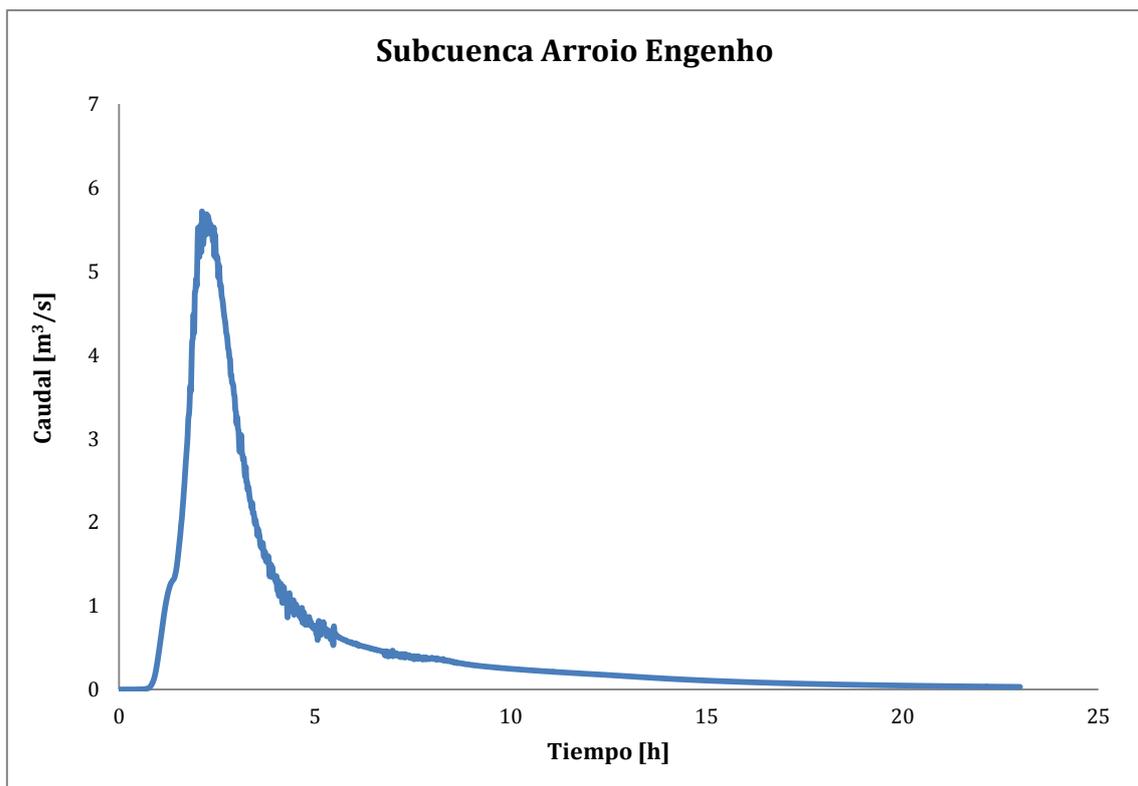


Figura 11-53 – Evento 11. Hidrograma de salida subcuenca Arroio Engenho.

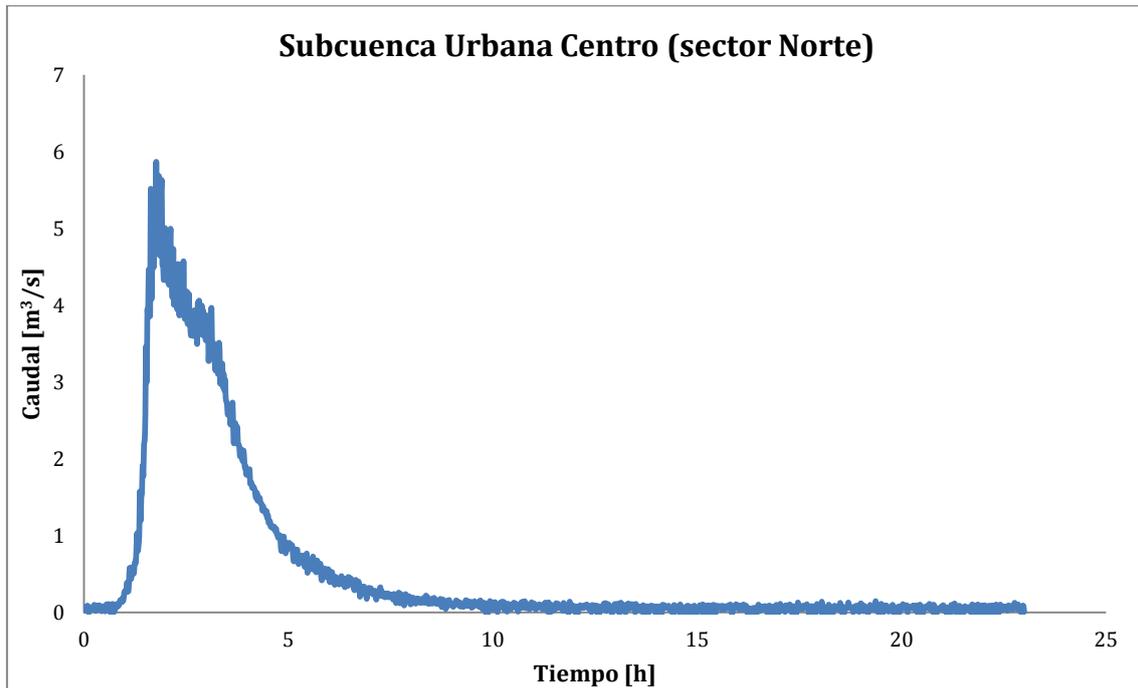


Figura 11-54 - Evento 11. Hidrograma de salida Río Cascavel, sector Norte.

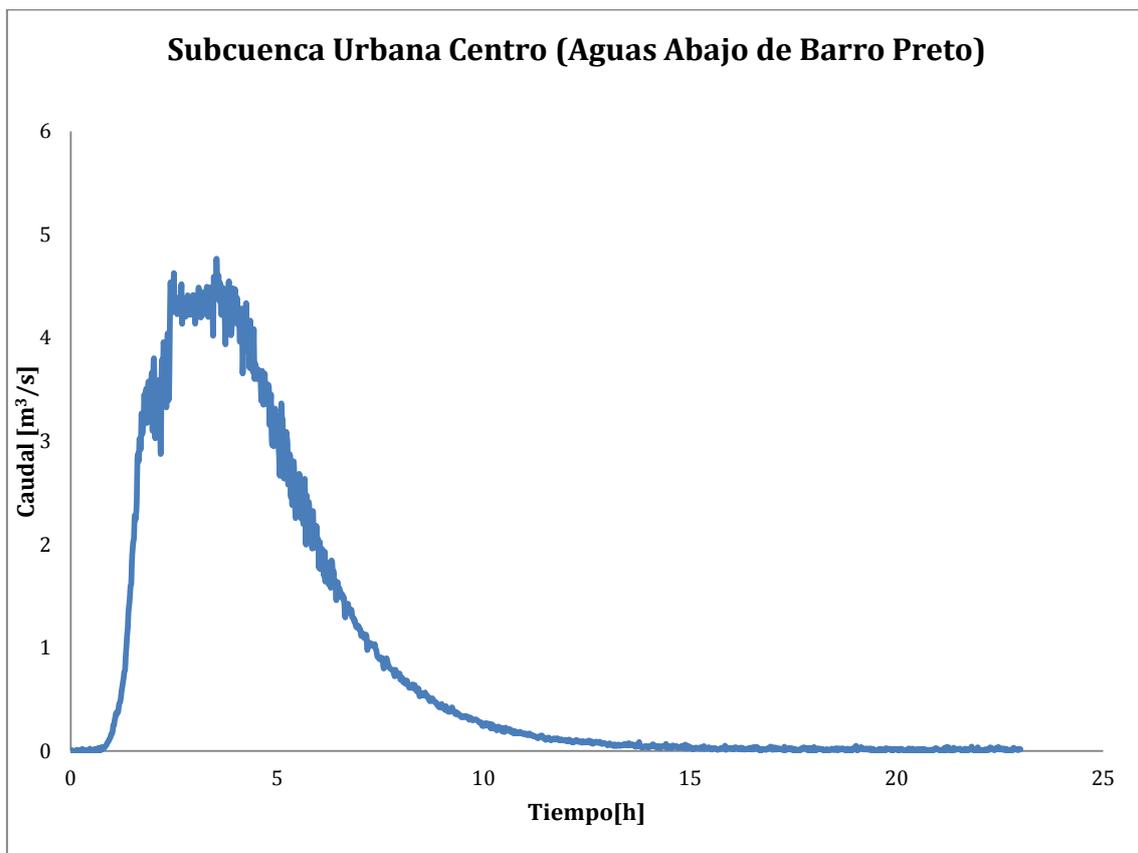


Figura 11-55 - Evento 11. Hidrograma de salida Río Cascavel, aguas abajo de Arroio Barro Preto.

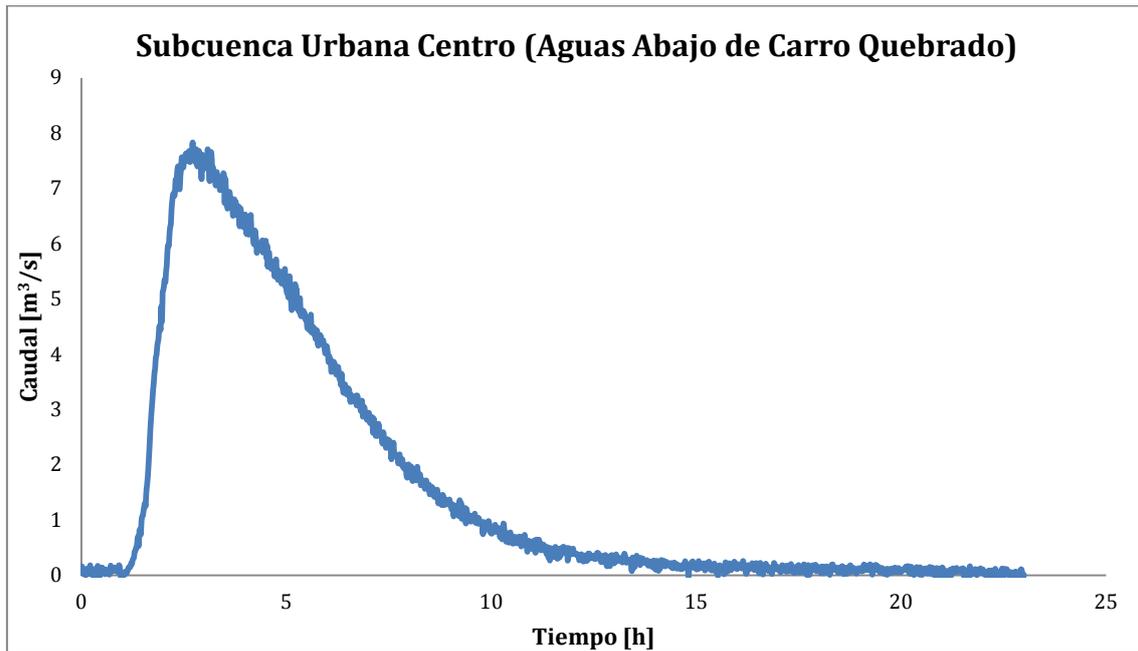


Figura 11-56 – Evento 11. Hidrograma de salida Río Cascavel, aguas abajo de Arroio Carro Quebrado.

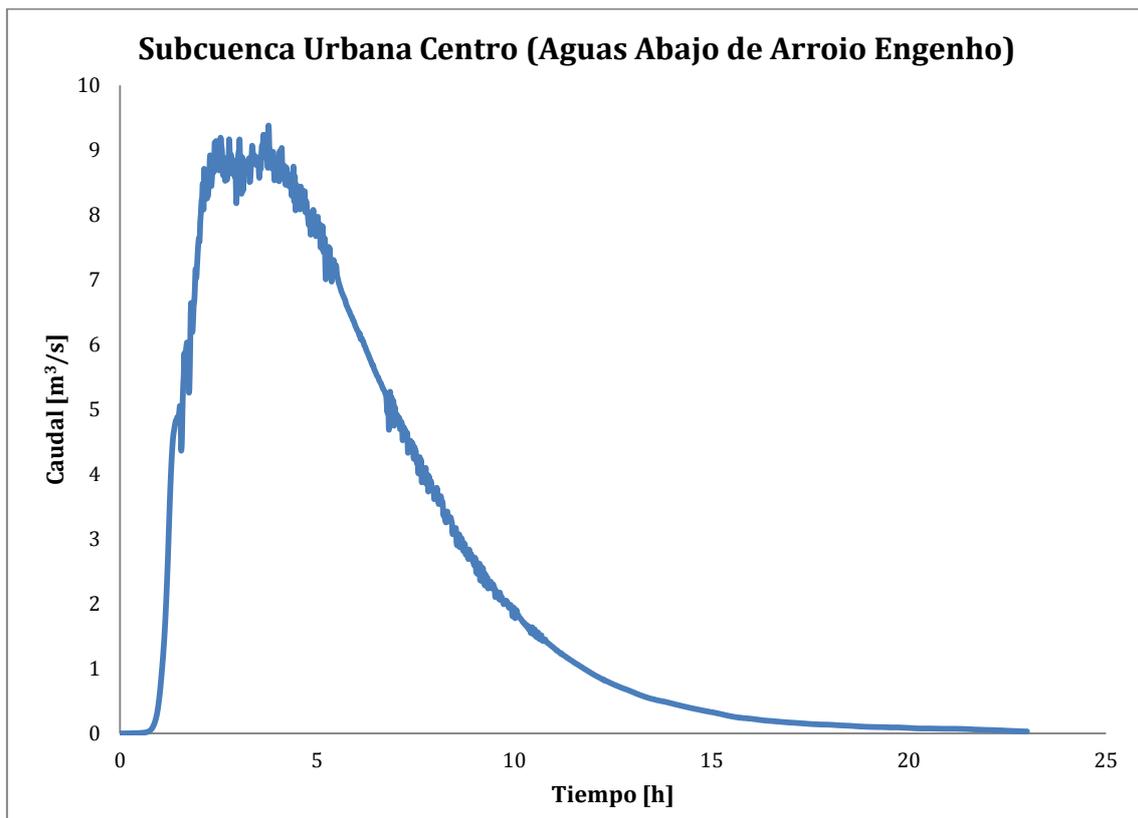


Figura 11-57 – Evento 11. Hidrograma de salida Río Cascavel, aguas abajo de Arroio Engenho.

11.8. Evento 12.

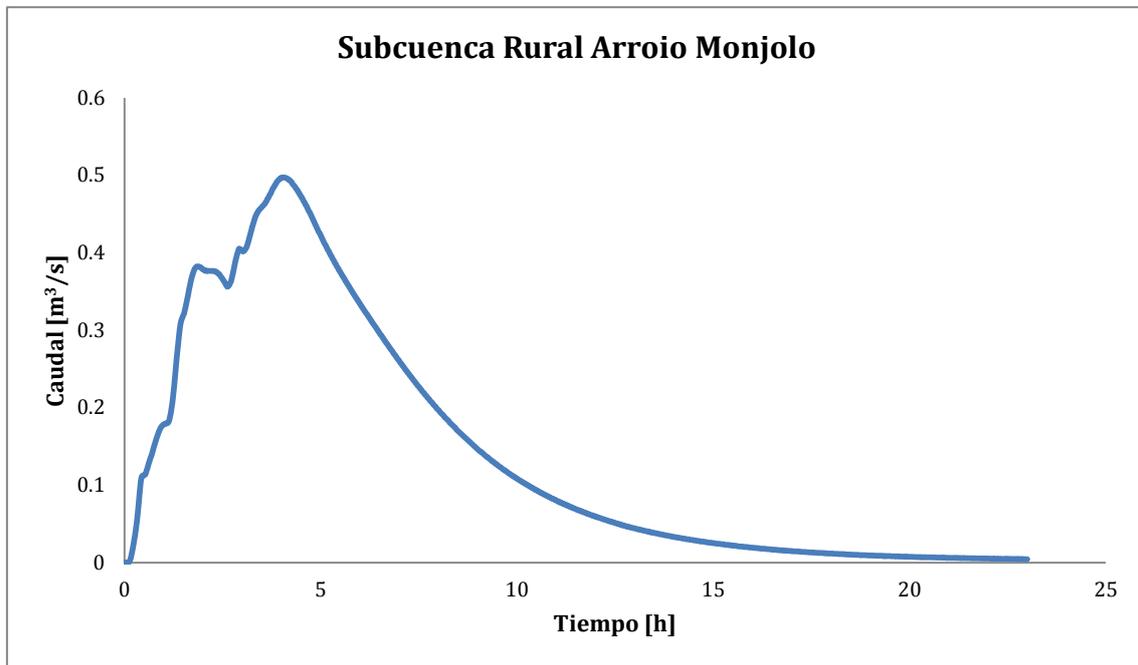


Figura 11-58 - Evento 12. Hidrograma de salida subcuenca Arroio Monjolo.

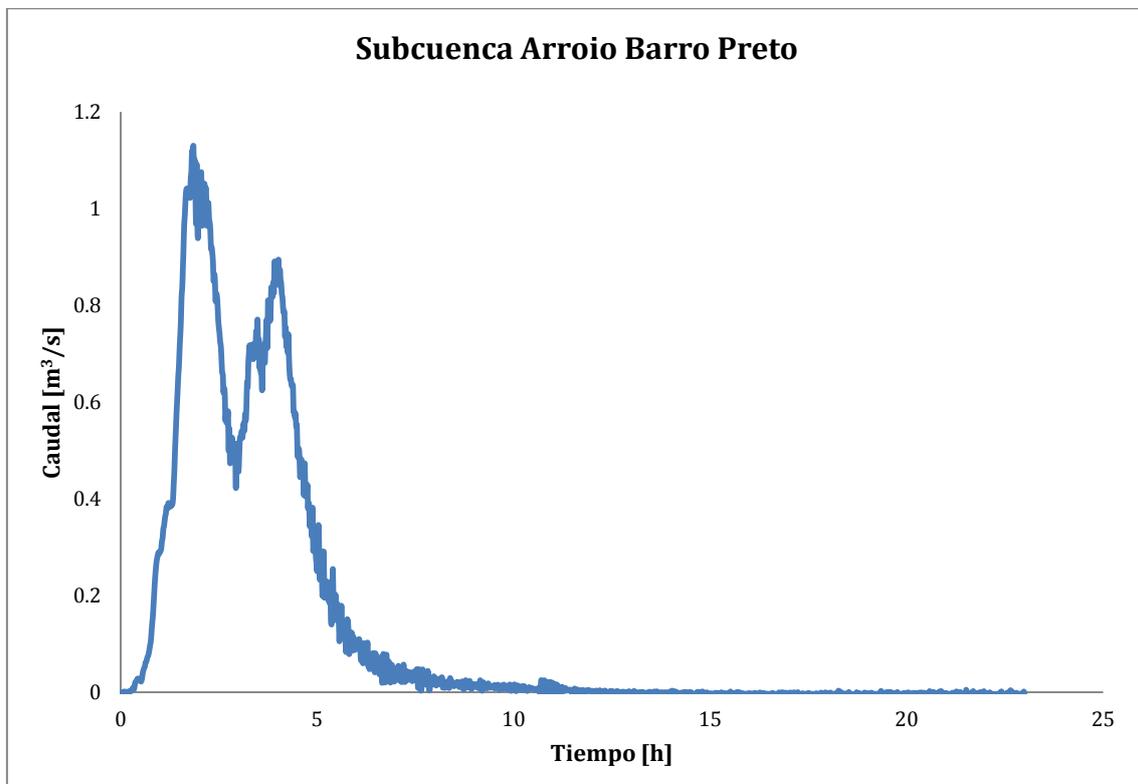


Figura 11-59 - Evento 12. Hidrograma de salida subcuenca Arroio Barro Preto.

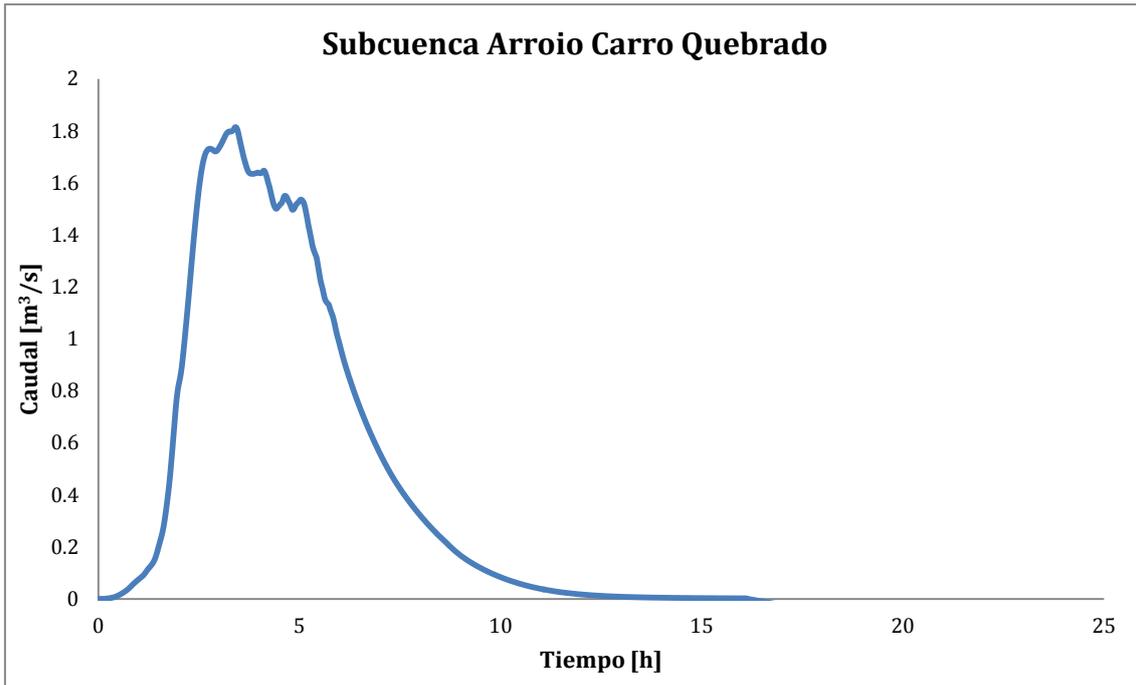


Figura 11-60 – Evento 12. Hidrograma de salida subcuenca Arroio Carro Quebrado.

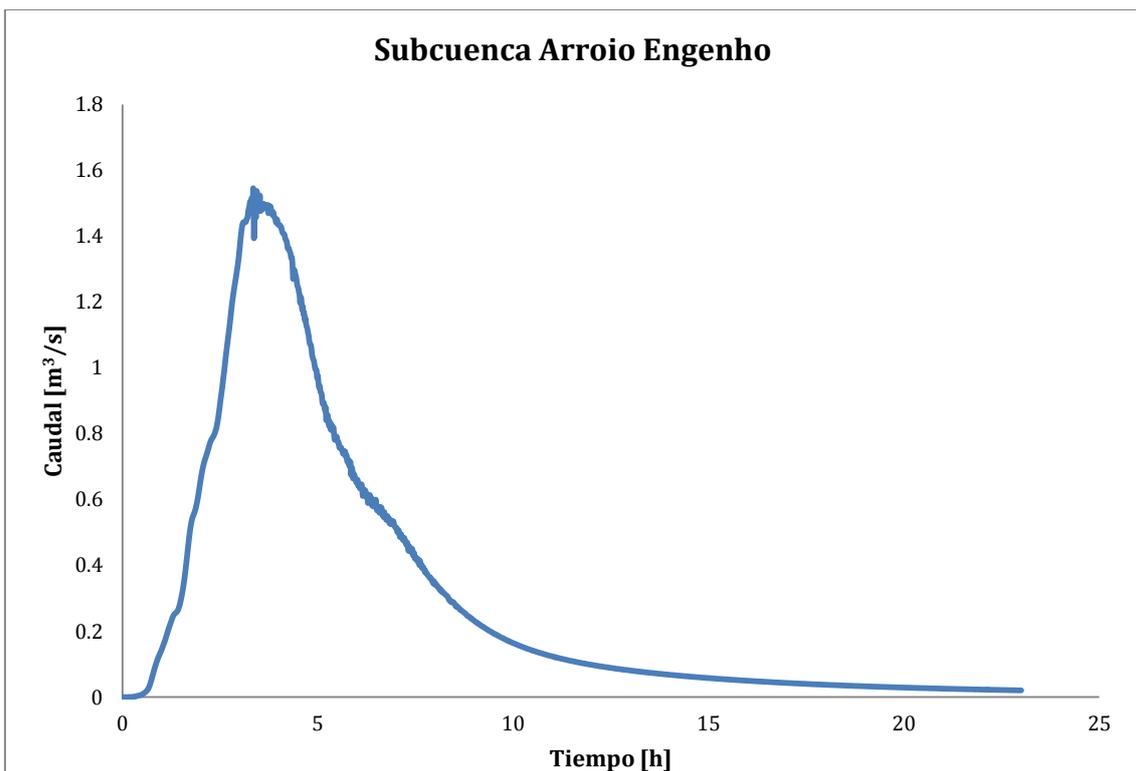


Figura 11-61 – Evento 12. Hidrograma de salida subcuenca Arroio Engenho.

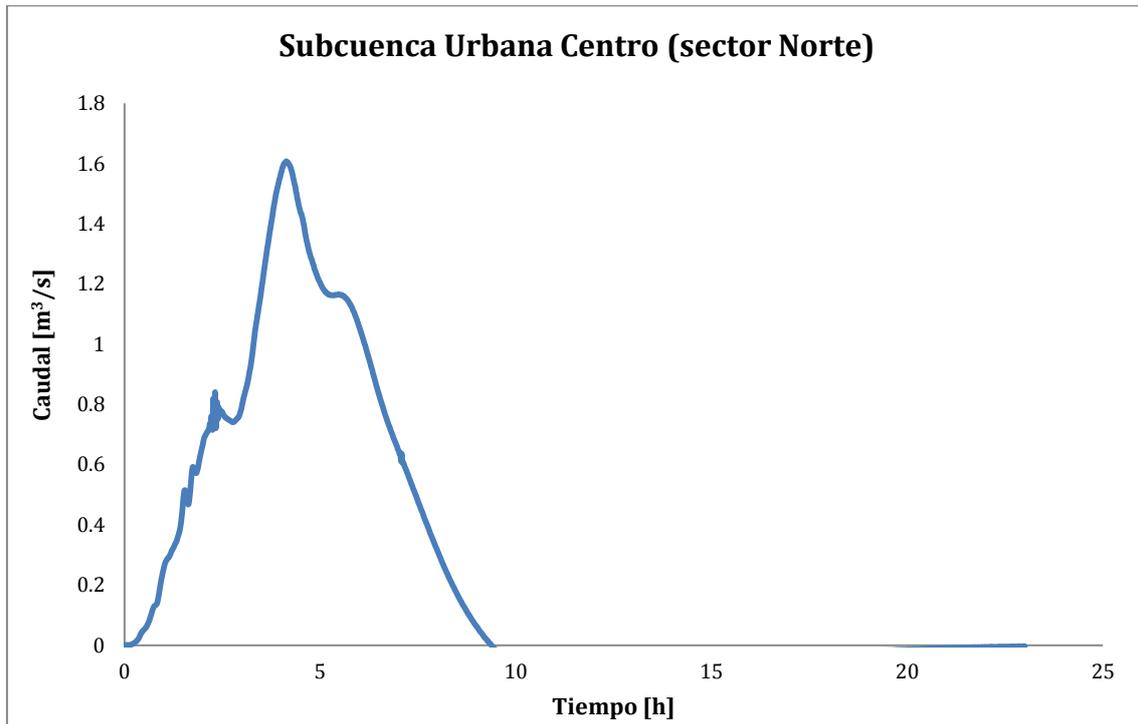


Figura 11-62 – Evento 12. Hidrograma de salida Río Cascavel, sector Norte.

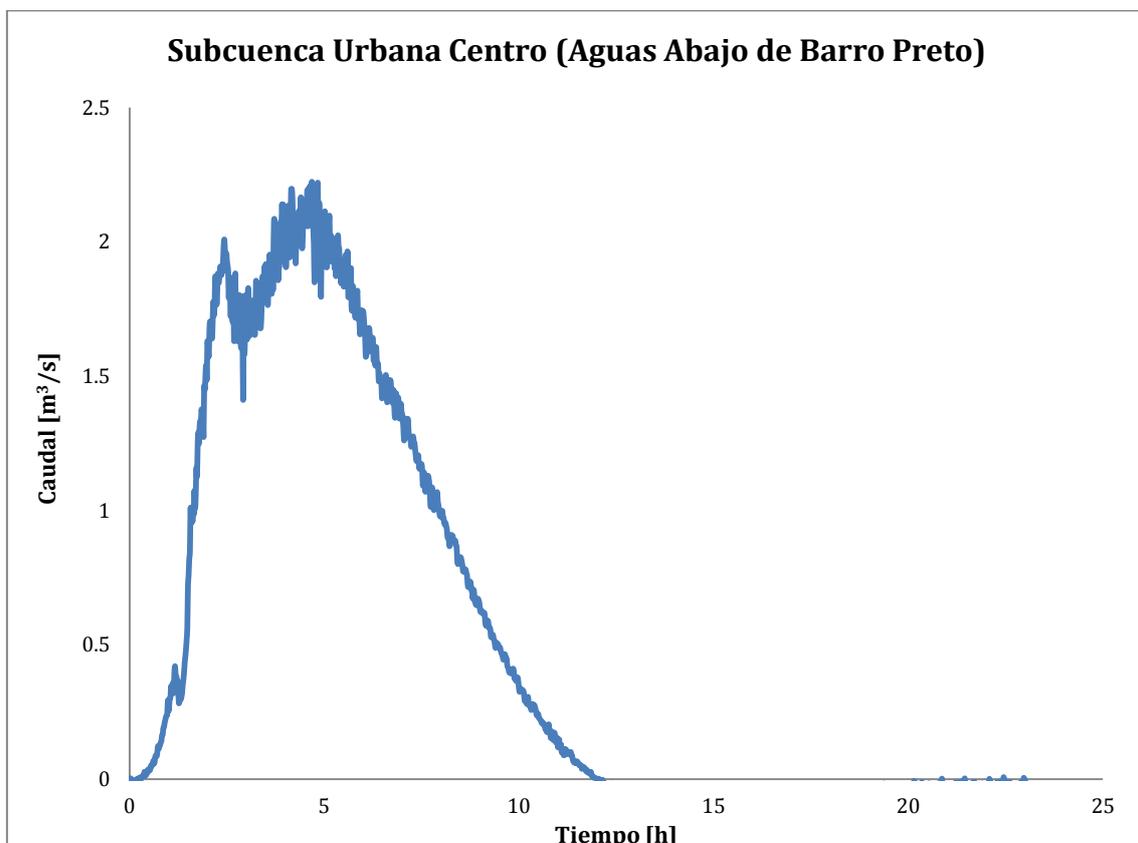


Figura 11-63 – Evento 12. Hidrograma de salida Río Cascavel, aguas abajo Arroio Barro Preto.

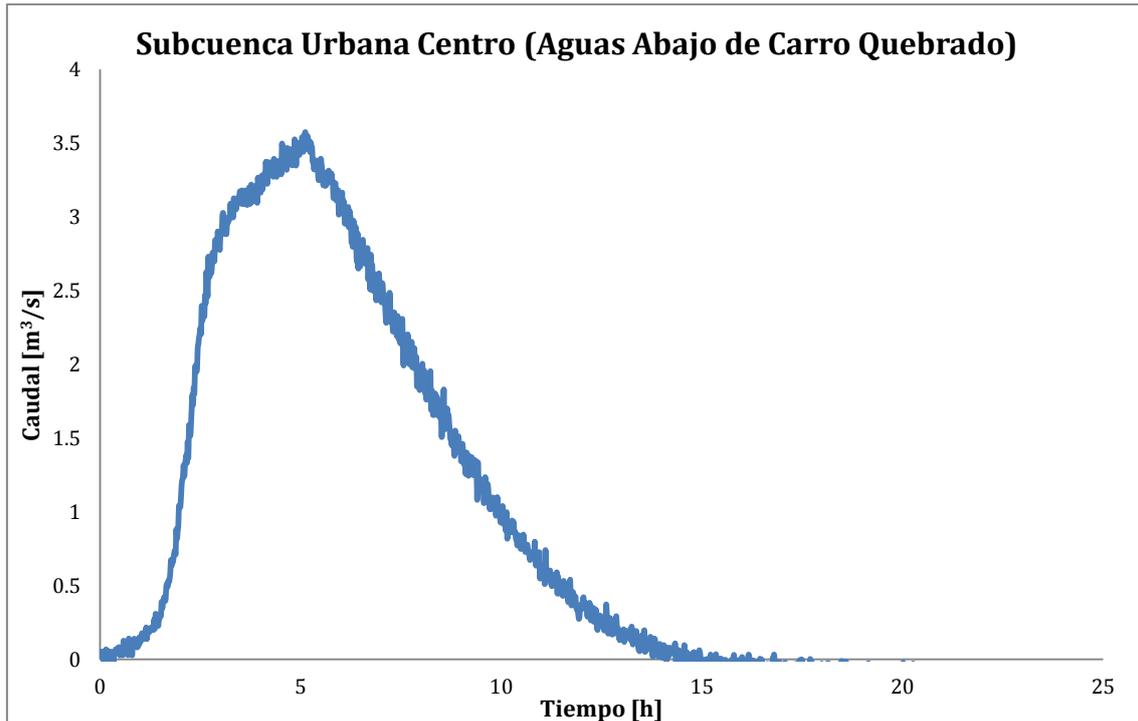


Figura 11-64 – Evento 12. Hidrograma de salida Río Cascavel, aguas abajo Arroio Carro Quebrado.

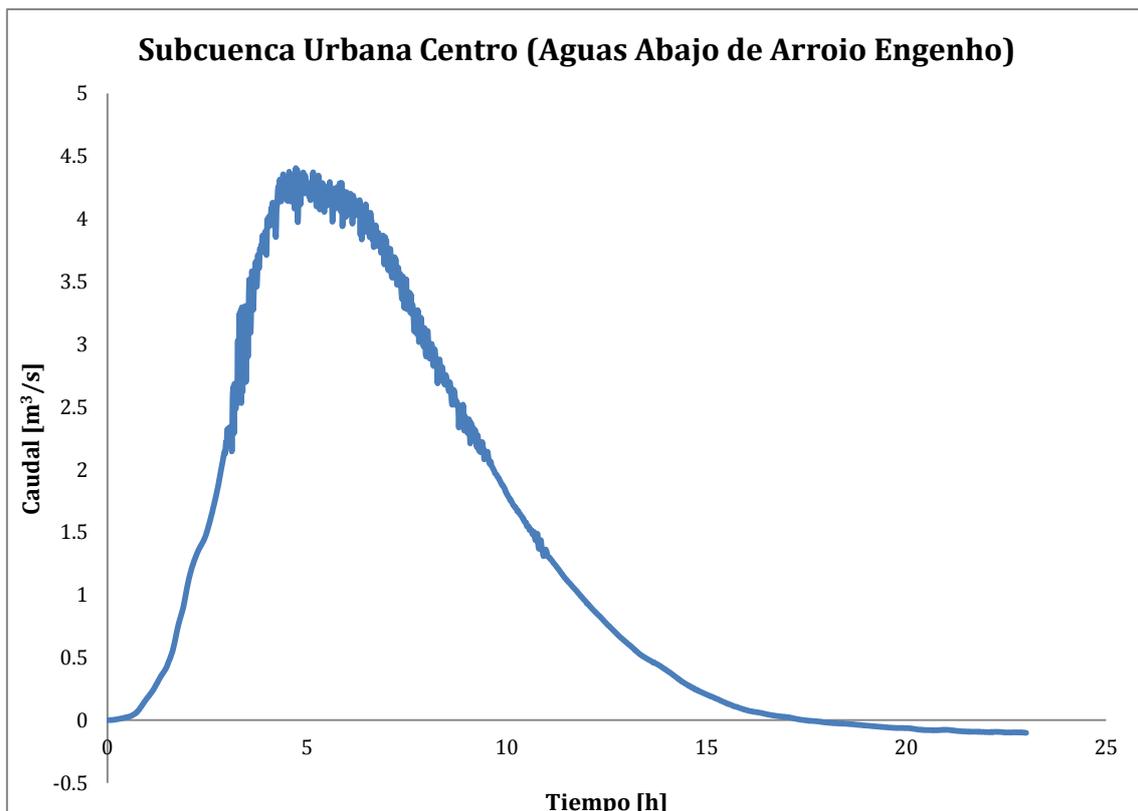


Figura 11-65 – Evento 12. Hidrograma de salida Río Cascavel, aguas abajo Arroio Engenho.

11.9. Evento 13.

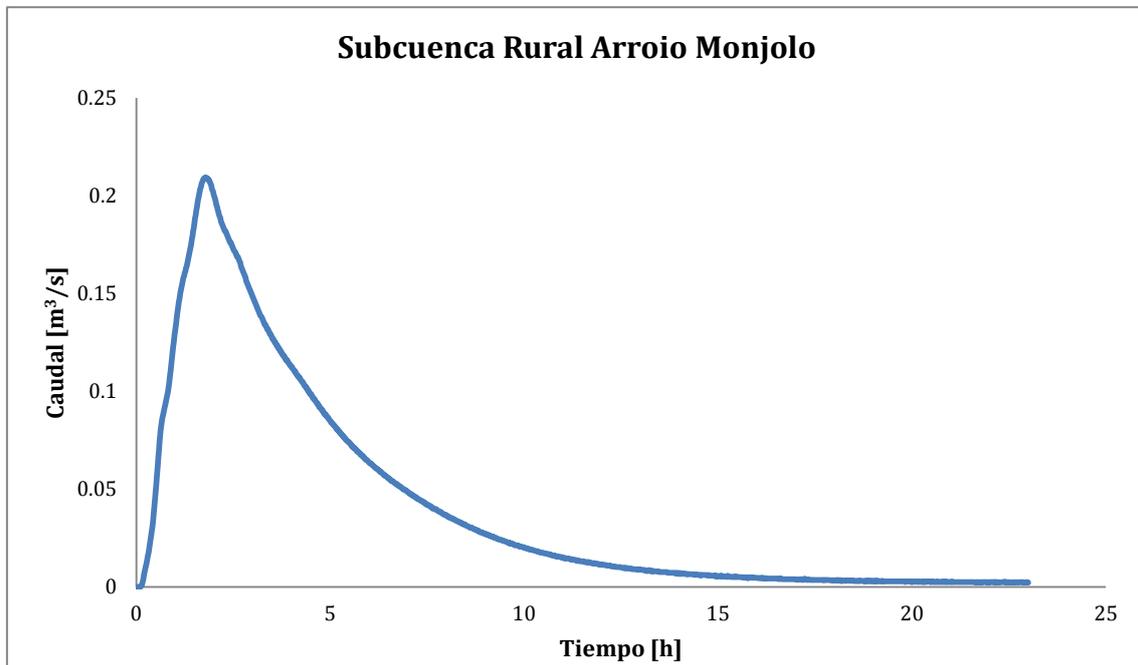


Figura 11-66 - Evento 13. Hidrograma de salida subcuenca Arroio Monjolo.

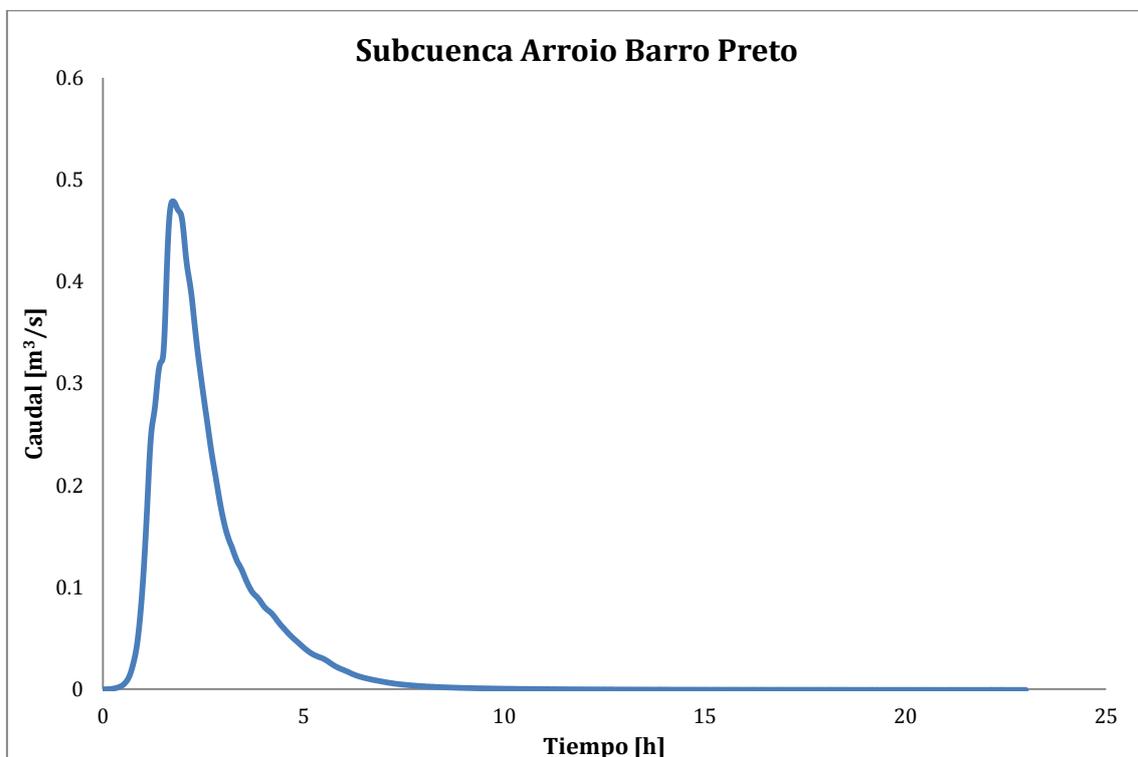


Figura 11-67 - Evento 13. Hidrograma de salida subcuenca Arroio Barro Preto.

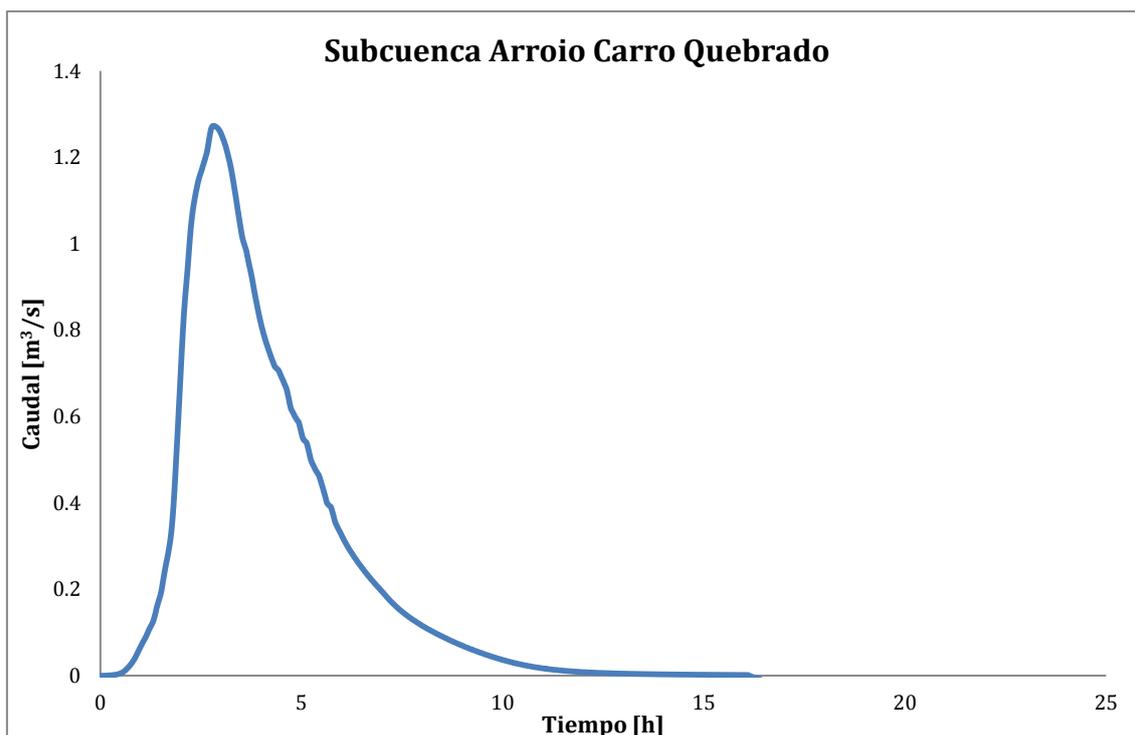


Figura 11-68 – Evento 13. Hidrograma de salida subcuenca Arroio Carro Quebrado.

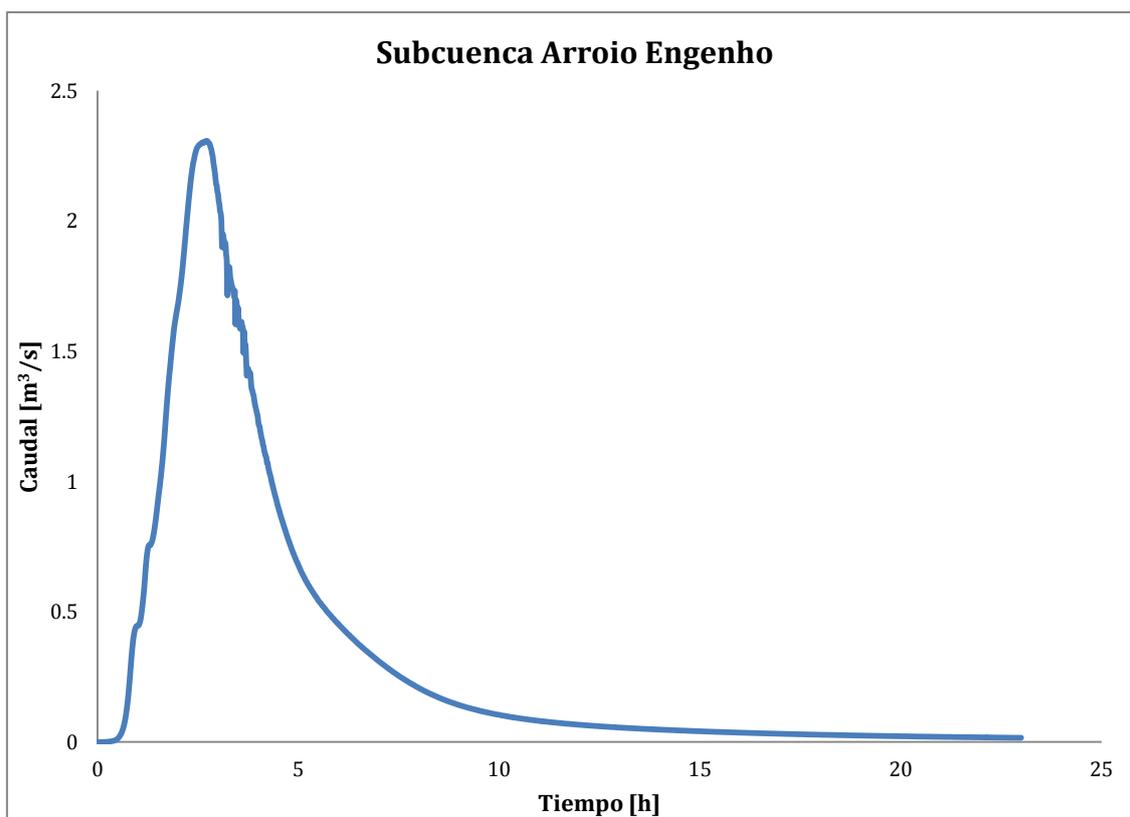


Figura 11-69 – Evento 13. Hidrograma de salida subcuenca Arroio Engenho.

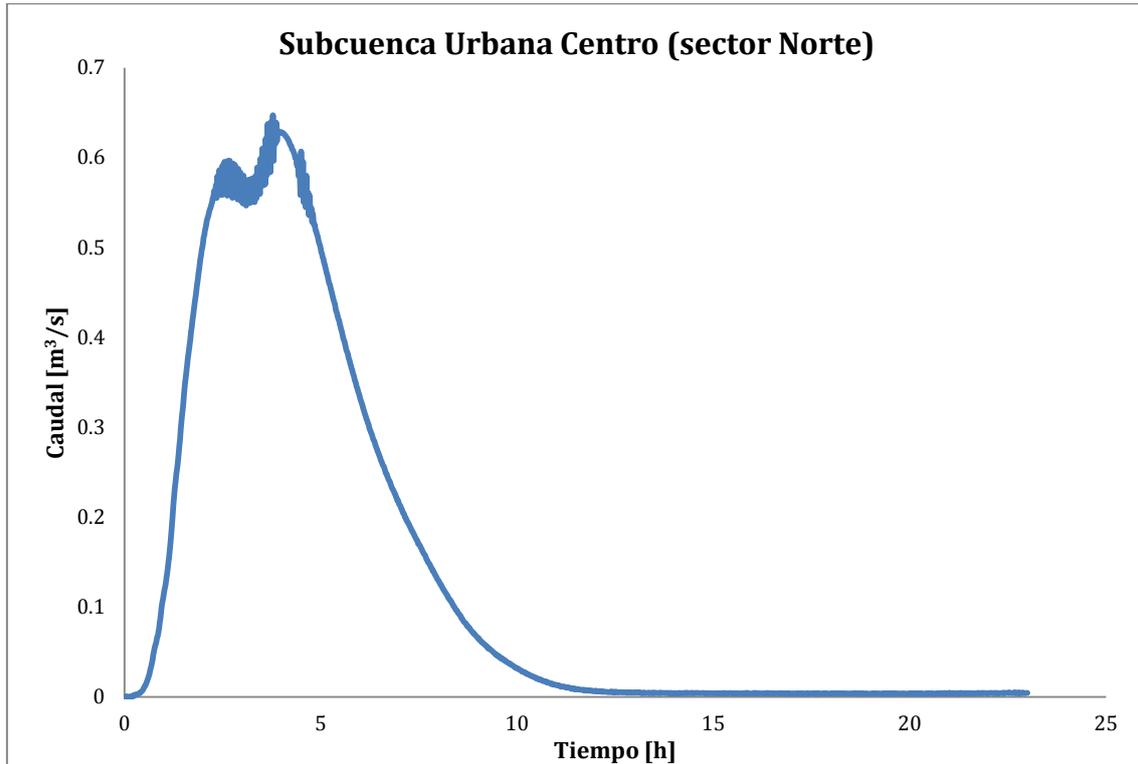


Figura 11-70 - Evento 13. Hidrograma de salida Río Cascavel, Sector Norte.

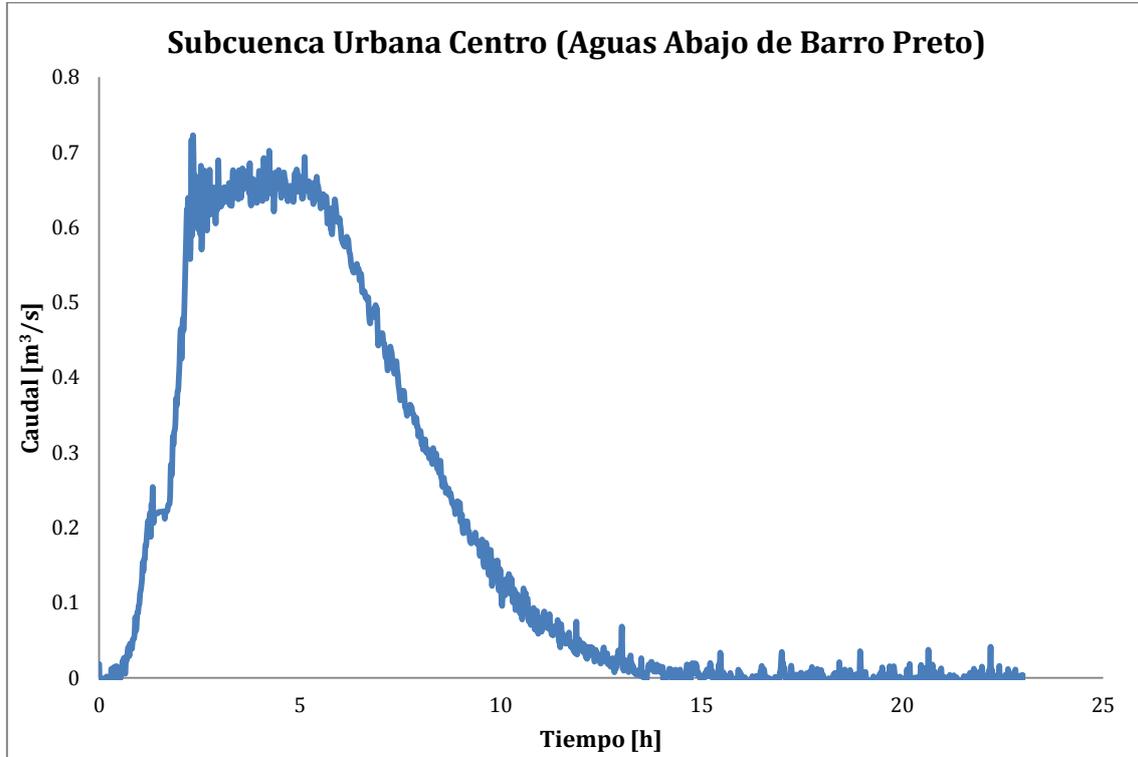


Figura 11-71 - Evento 13. Hidrograma de salida Río Cascavel, aguas abajo de Arroio Barro Preto.

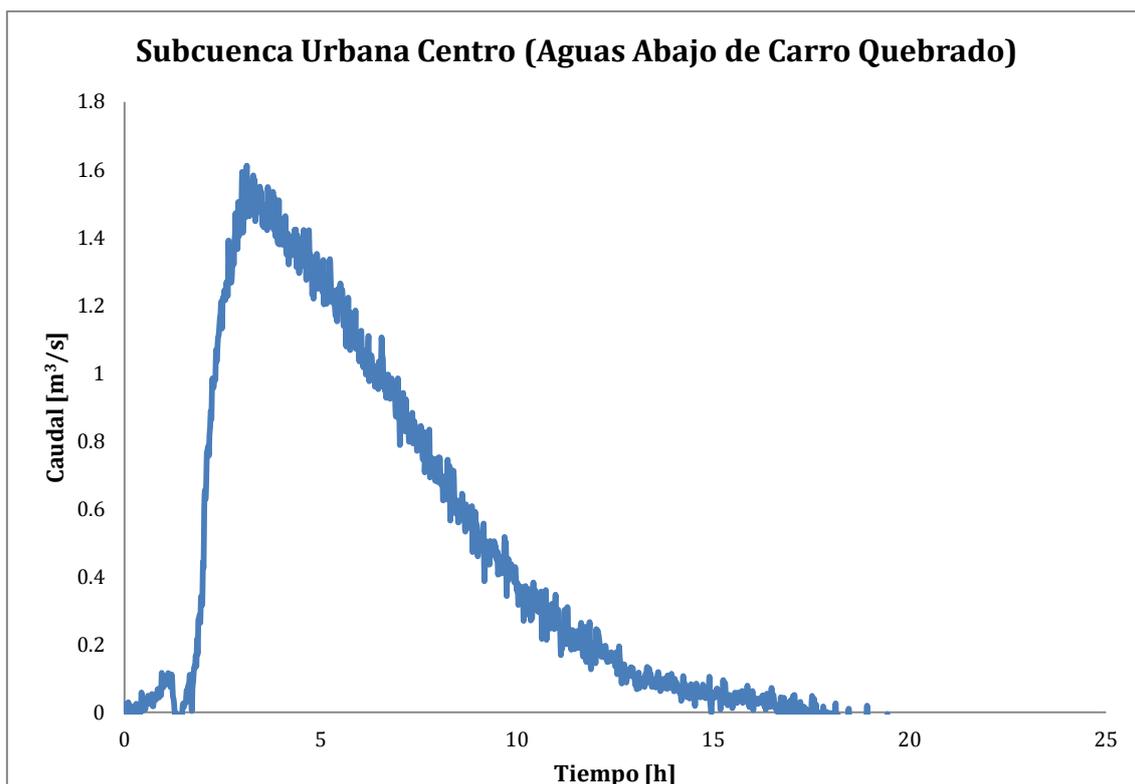


Figura 11-72 – Evento 13. Hidrograma de salida Río Cascavel, aguas abajo de Arroio Carro Quebrado.

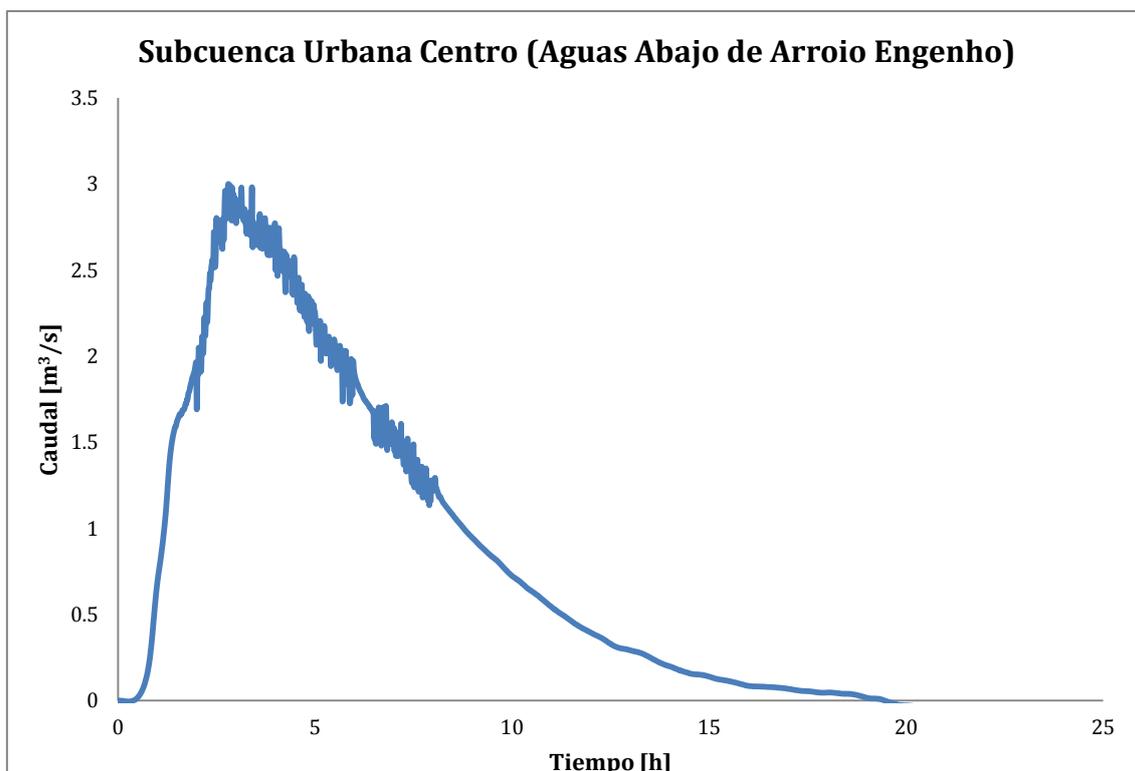


Figura 11-73 – Evento 13. Hidrograma de salida Río Cascavel, aguas abajo de Arroio Engenho.

11.10. Evento 14.

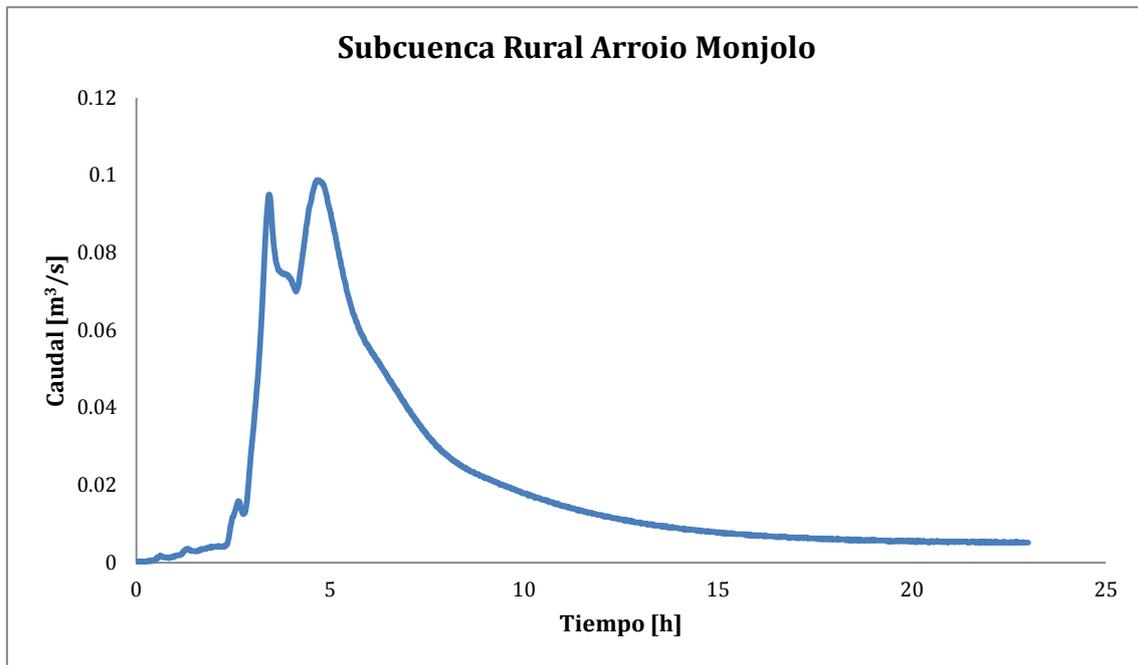


Figura 11-74 - Evento 14. Hidrograma de salida Subcuenca Arroio Monjolo.

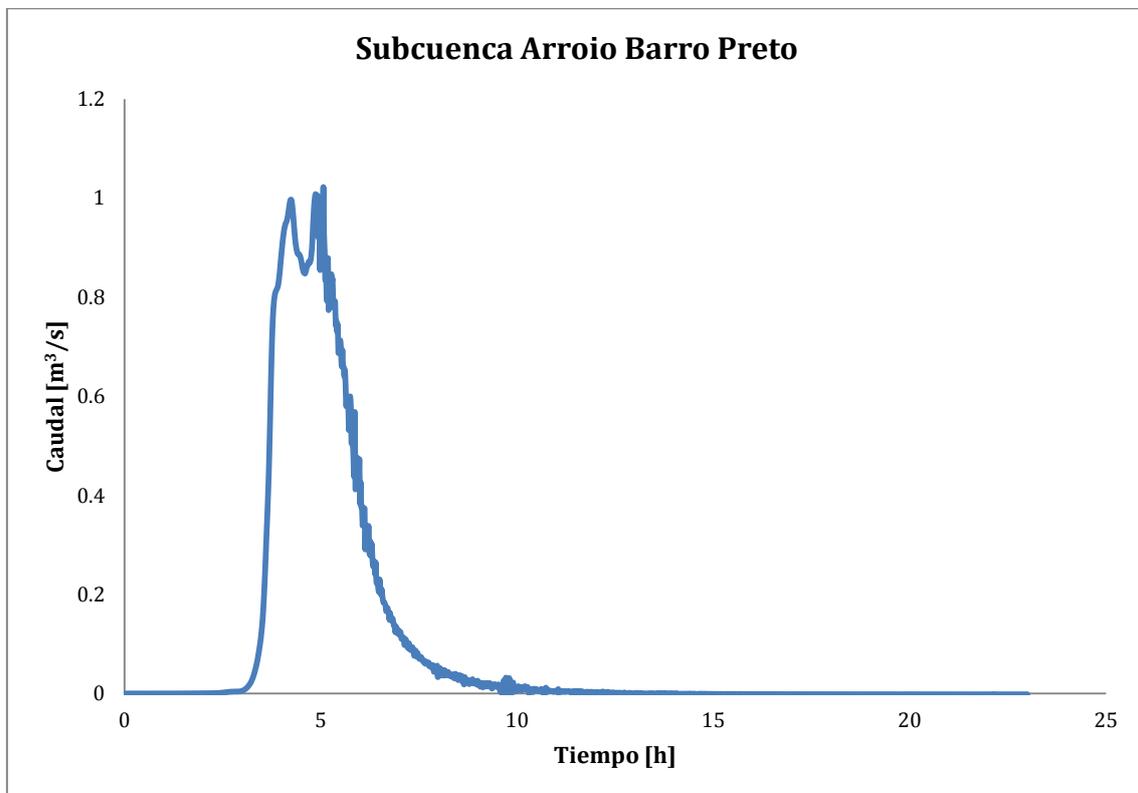


Figura 11-75 - Evento 14. Hidrograma de salida Subcuenca Arroio Barro Preto.

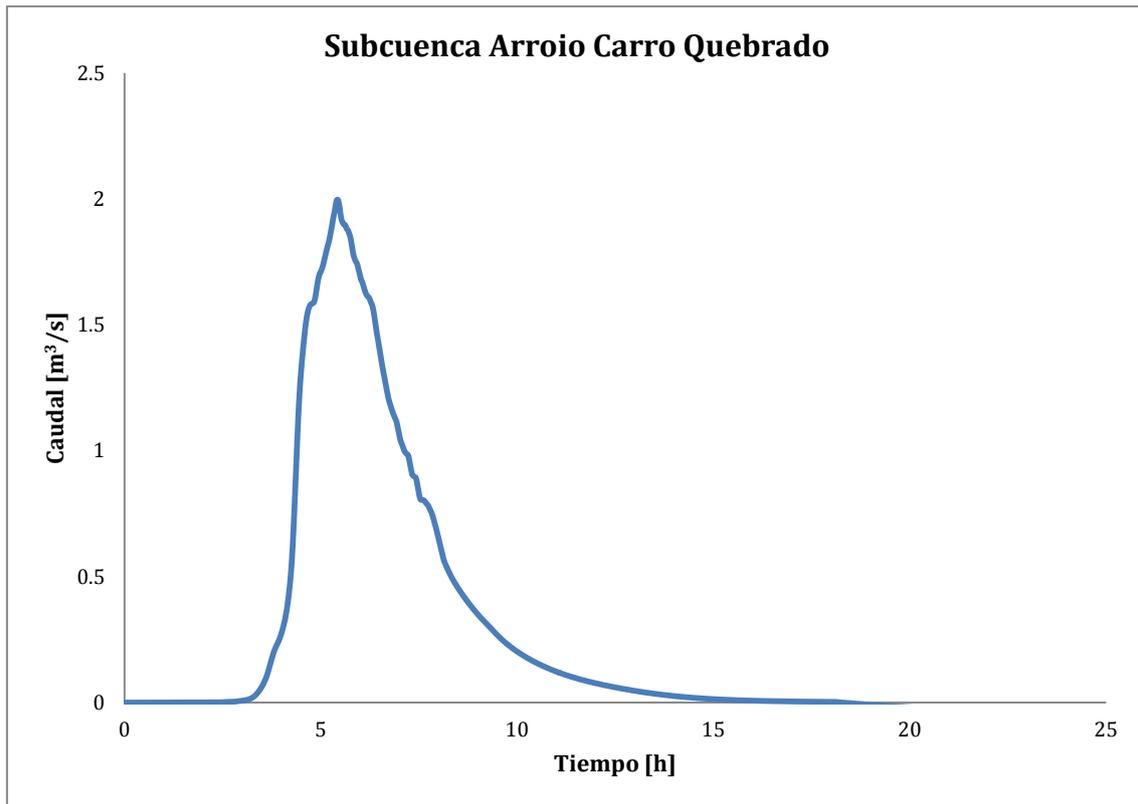


Figura 11-76 – Evento 14. Hidrograma de salida Subcuenca Arroio Carro Quebrado.

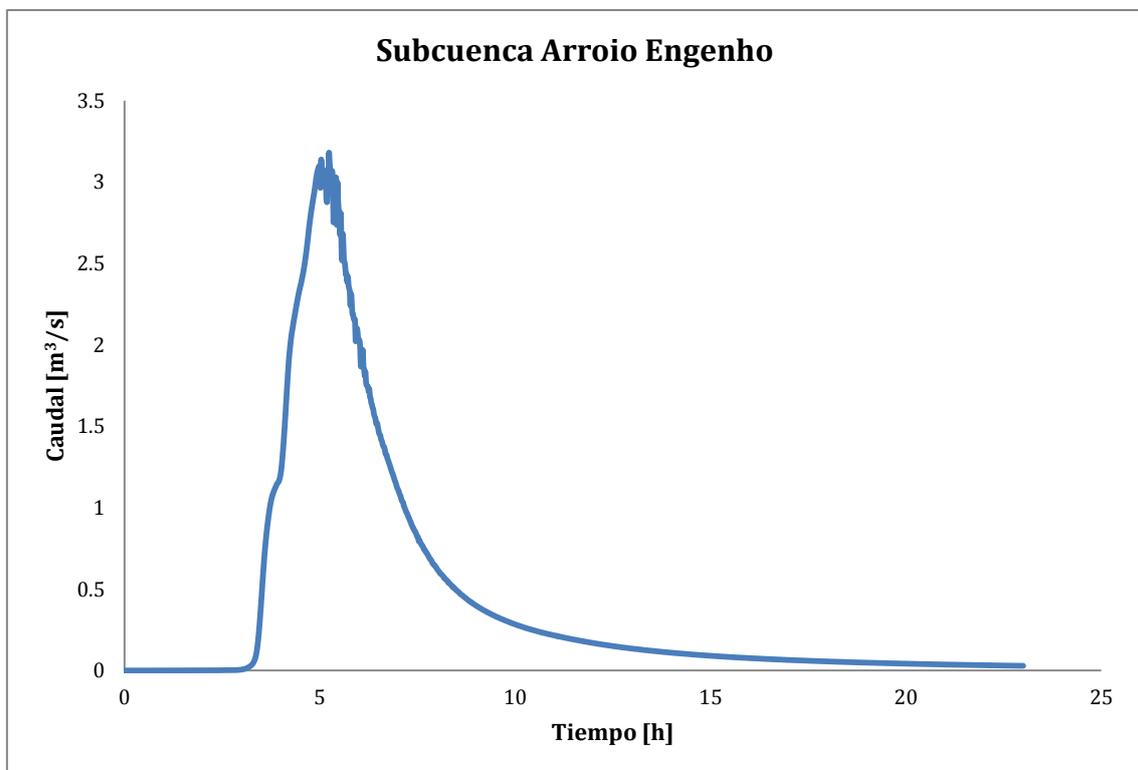


Figura 11-77 – Evento 14. Hidrograma de salida Subcuenca Arroio Engenho.

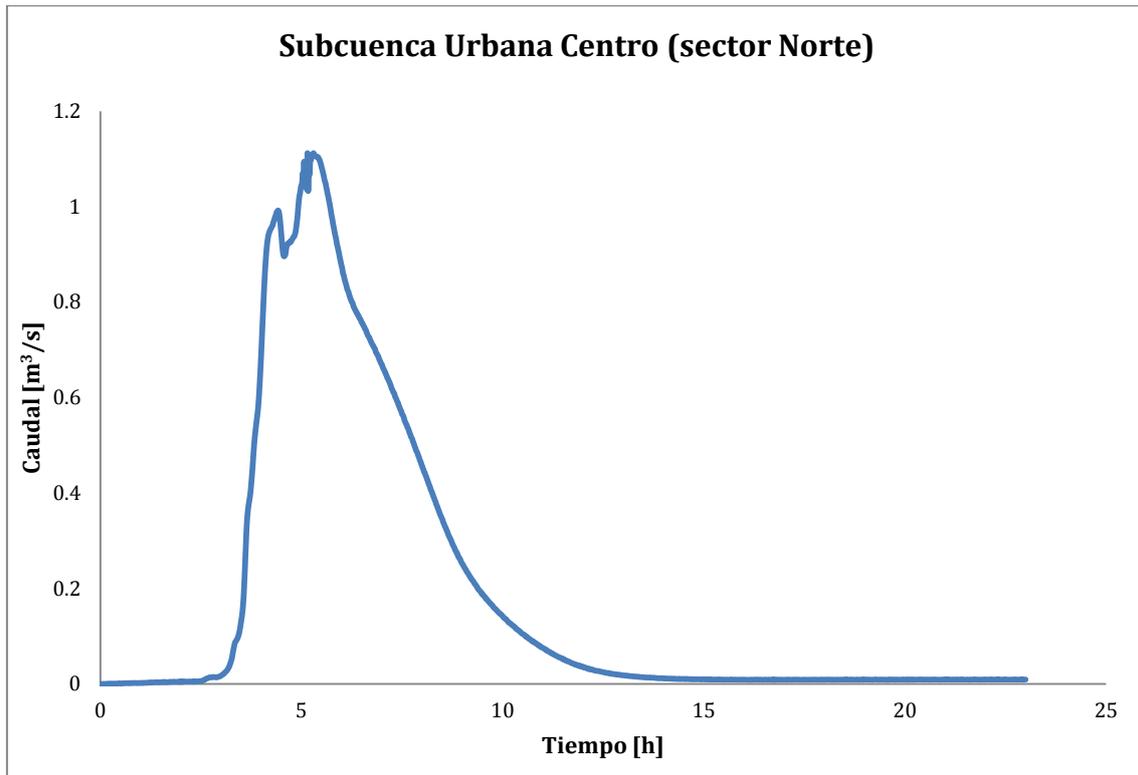


Figura 11-78 - Evento 14. Hidrograma de salida Río Cascavel, sector Norte.

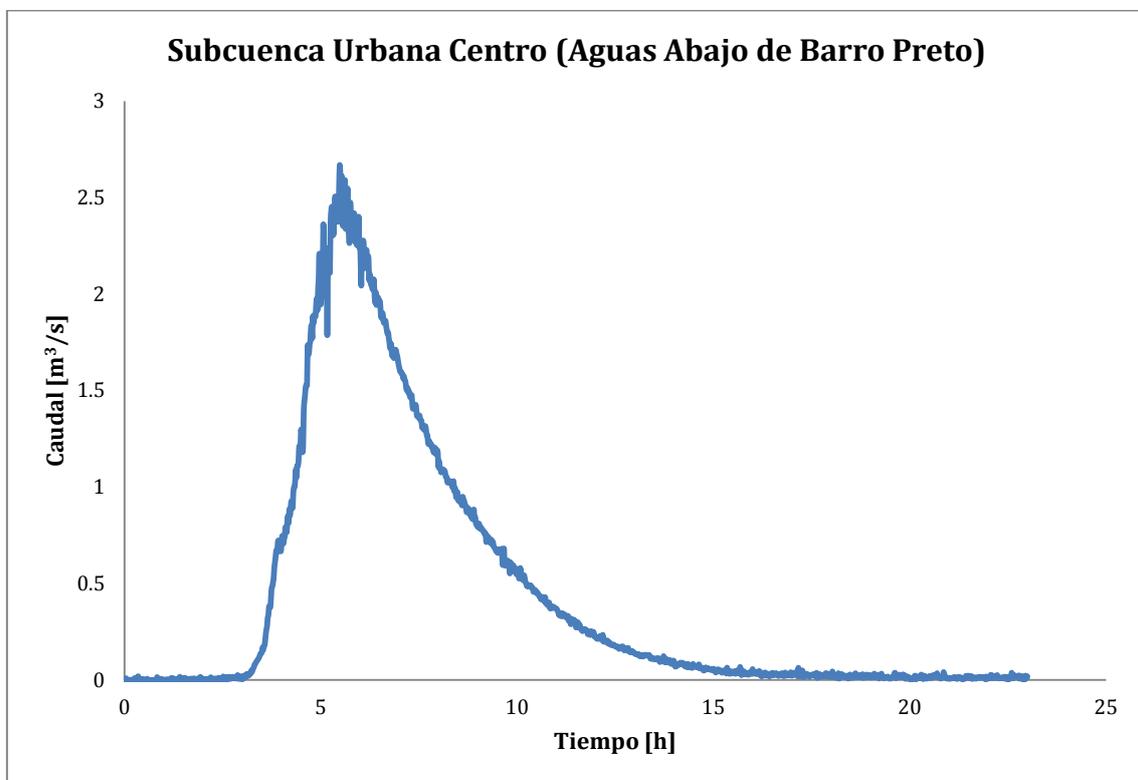


Figura 11-79 - Evento 14. Hidrograma de salida Río Cascavel, aguas abajo Arroio Barro Preto.

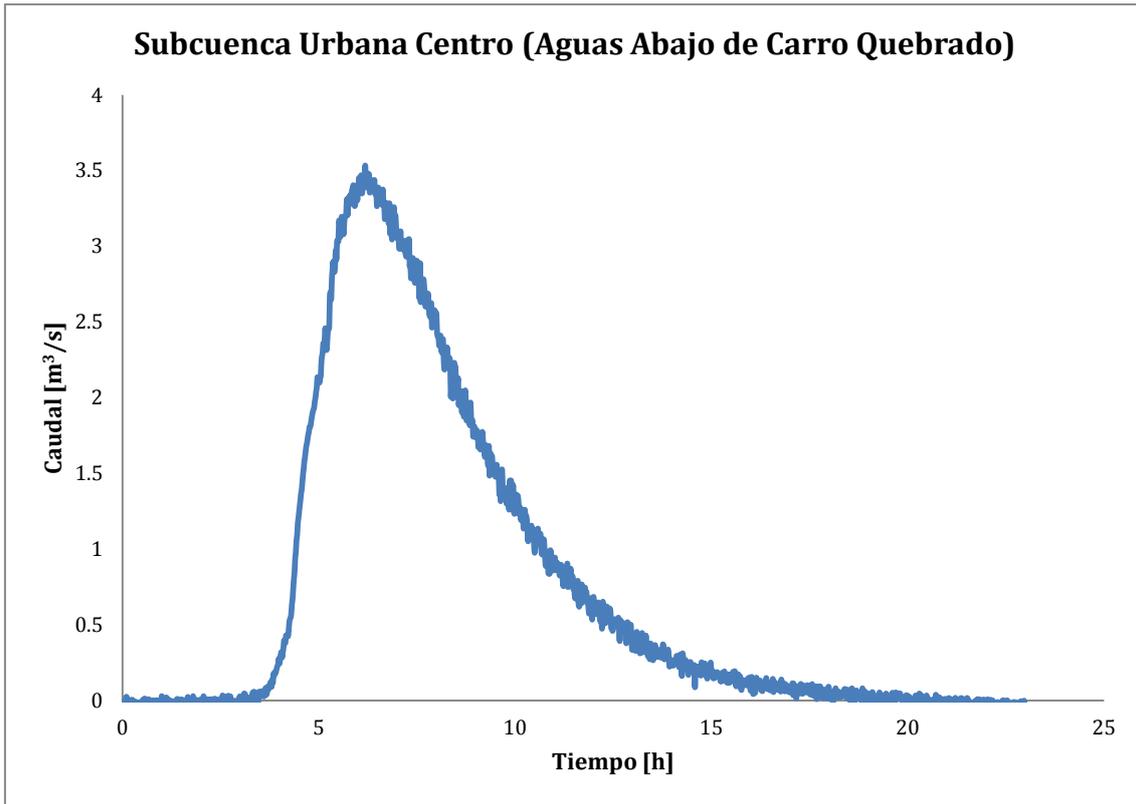


Figura 11-80 – Evento 14. Hidrograma de salida Río Cascavel, aguas abajo Arroio Carro Quebrado.

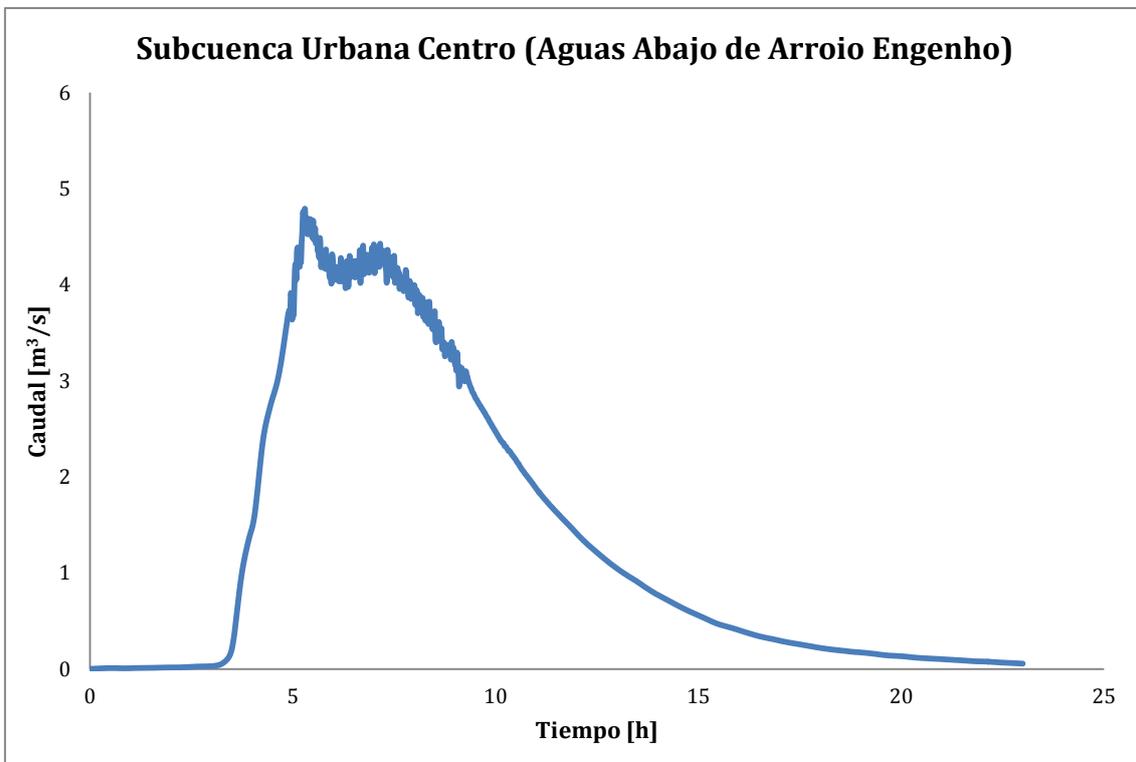


Figura 11-81 – Evento 14. Hidrograma de salida Río Cascavel, aguas abajo Arroio Engenho.