

# Dinámica del escurrimiento superficial en calles de una cuenca urbana sometida a intensas precipitaciones en la provincia de misiones

*Tomás Rodríguez<sup>1</sup> y Gerardo Riccardi<sup>2,3</sup>*

<sup>1</sup> Becario Consejo Nacional de Investigaciones Científicas y Técnicas (CONICET), Facultad de Ingeniería, Universidad Nacional de Misiones (UNaM), Juan Manuel de Rosas 325, (3360) Oberá, Misiones, Argentina.

<sup>2</sup> Centro Universitario Rosario de Investigaciones Hidroambientales (CURIHAM), Facultad de Ciencias Exactas, Ingeniería y Agrimensura, Universidad Nacional de Rosario (UNR), Riobamba 245 bis, (2000) Rosario, Argentina.

<sup>3</sup>Consejo de Investigaciones de la Universidad Nacional de Rosario.

Mail de contacto: rodriguezdt@fio.unam.edu.ar

## RESUMEN

La provincia de Misiones, situada en una región subtropical sin estación seca, exhibe algunas de las mayores precipitaciones anuales del país, particularmente la zona centro, presenta módulos pluviométricos que rondan los 2.000 mm. Las óptimas características de retención al escurrimiento superficial de la Selva Misionera y la eficiente capacidad de evacuación de caudales de la topografía serrana, han reducido históricamente los impactos por inundación en una región sometida a grandes volúmenes de precipitación en reducidos lapsos de tiempo. Sin embargo, las ciudades jóvenes en continua expansión sobre la selva autóctona, comienzan a impactar fuertemente en la dinámica del escurrimiento superficial de las cuencas, mediante los cambios en las ocupaciones y usos del suelo y la construcción de sistemas de desagües pluviales materializados por calles y conductos. El presente trabajo aborda la descripción del escurrimiento superficial en calles de una cuenca urbana de la ciudad de Oberá, Misiones. A través de un modelo hidrológico - hidráulico en el entorno del SWMM 5.0vE, se confeccionaron mapas de niveles y velocidades máximas en cunetas de calles para eventos lluviosos de 100, 126 y 201 mm de precipitación total con 12 hs de duración, correspondientes a 2, 5 y 100 años de recurrencia respectivamente.

**Palabras clave:** cuencas urbanas; precipitaciones intensas; modelación hidrológica -hidráulica; mapas de inundación.

## ABSTRACT

The province of Misiones, situated in a subtropical region with no dry season, presents the highest annual rainfall in the country. Particularly, the central region presents annual rainfall modules of around 2000 mm. The optimal characteristics of runoff retention of the rainforest as well as the efficient runoff capacity of the natural topography, have historically reduced the flood impacts in a region subject to large volumes of rainfall in small periods of time. However, the continued expansion of the young cities over the native rainforest, has begun to impact strongly on the dynamics of watershed runoff. The changes of the use and land occupation and construction of storm drains systems materialized by ditches, conduits and streets have incremented the maximum discharges and runoff volumes. In order to the contribute to the solution of this hydric problematic, this work studies the description of surface runoff in streets of an urban watershed of the city of Oberá, Misiones. Maps of maximum water levels and flow velocities were developed by mean of the hydraulic model SWMM 5.0vE, using rainfall events of 100, 126 and 201 mm of total rainfall with 12 hours of duration, related to 2, 5 and 100 years of recurrence.

**Keywords:** urban watershed; intense rainfall; hydrologic-hydraulic modeling; inundation maps.

# 1 INTRODUCCIÓN

La provincia de Misiones se encuentra situada en una región subtropical sin estación seca, exhibiendo algunos de las mayores precipitaciones anuales del país (Mezher et al., 2008). Según la calificación climática de Papadakis (1962) citado por Olinuk (1998) la zona de estudio corresponde a un régimen isohigro, donde las estaciones hídricas están poco definidas y en cualquier estación, o mes, pueden presentarse sequías o abundantes lluvias. Región azotada por tormentas intensas con grandes volúmenes de precipitación ocurrentes en cortos periodos de tiempo, generalmente asociadas a frentes fríos provenientes del Sudoeste (Litwin y Franco, 1987), como lo evidencia el evento del 1 de diciembre de 2012, con 276 mm precipitados en 12 horas.

Con un modulo anual de 1925 mm (CELO, 2013), la ciudad de Oberá, se encuentra ubicada en la zona centro de la provincia de Misiones, en la confluencia de las Rutas Nacional 14 y Provincial 105 (Fig. 1.a y b). Al tratarse de una ciudad joven, fundada en 1927, presenta grandes áreas verdes dentro del ejido urbano, con lotes residenciales y espacios públicos que conservan áreas permeables con pastos y árboles de mediana magnitud.



**Figura 1. a** - Ubicación geográfica de Oberá. **b** - Casco urbano de Oberá (Google Earth®, 2013)

Sin embargo, la dinámica que plantean las urbanizaciones han contribuido a incrementar las afectaciones como: aumento del riesgo de inundación; decrecimiento de la calidad del agua superficial y subterránea; e incremento los procesos de erosión y sedimentación. El aumento de caudales máximos y volúmenes de escurrimiento directo, conjuntamente con la disminución del tiempo de concentración de las cuencas debido a la impermeabilización de los suelos y los cambios en su ocupación, han aumentado el riesgo por inundación dentro y fuera de la zona urbanas de las ciudades (Rodríguez et al., 2013a).

El presente trabajo tuvo como objetivo describir la dinámica del escurrimiento superficial en las calles de la cuenca del arroyo Mbotaby, en la ciudad de Oberá, con fines para la evaluación de amenazas por inundación. Dicha evaluación se llevó a cabo mediante la determinación de niveles máximos y velocidades máximas a través de la simulación de escurrimiento por medio de modelación matemática hidrológica-hidráulica. La transformación lluvia-caudal se realizó con la implementación del modelo SWMM 5.0ve (GMMF, 2005), a través de una constitución con un alto nivel de detalle. El mismo fue calibrado con la utilización de registros de hietogramas de diversas tormentas y los respectivos limnigramas generados en el arroyo receptor de los desagües pluviales.

Para la evaluación de amenazas de inundación se confeccionaron mapas de niveles y velocidades máximas desarrollados para una tormenta de duración crítica de 12 horas, con hietogramas determinados por el método de los bloques alternos, para 2, 5 y 100 años de recurrencias. Estos mapas que caracterizan la amenaza, en combinación con mapas de vulnerabilidad, podrán ser luego utilizados para determinar el riesgo por inundación.

## 2 LA CUENCA DEL ARROYO MBOTABY

### 2.1 Área de aporte

La cuenca en estudio comprende el área de aporte del arroyo Mbotaby. El brazo más largo de este arroyo nace al Este de la ciudad, en la divisoria de aguas de las cuencas del río Paraná y Uruguay (Fig. 2.a y b). Dicho arroyo recibe, aproximadamente, el 40 % de los excedentes hídricos superficiales del casco urbano de la ciudad de Oberá. Recorre el ejido urbano hacia el Oeste hasta, finalmente unirse al arroyo Tuichá para formar el arroyo Yabebiry, el cual desemboca en el río Paraná. Hasta el punto de control definido, la cuenca posee 976.41 Ha de superficie.

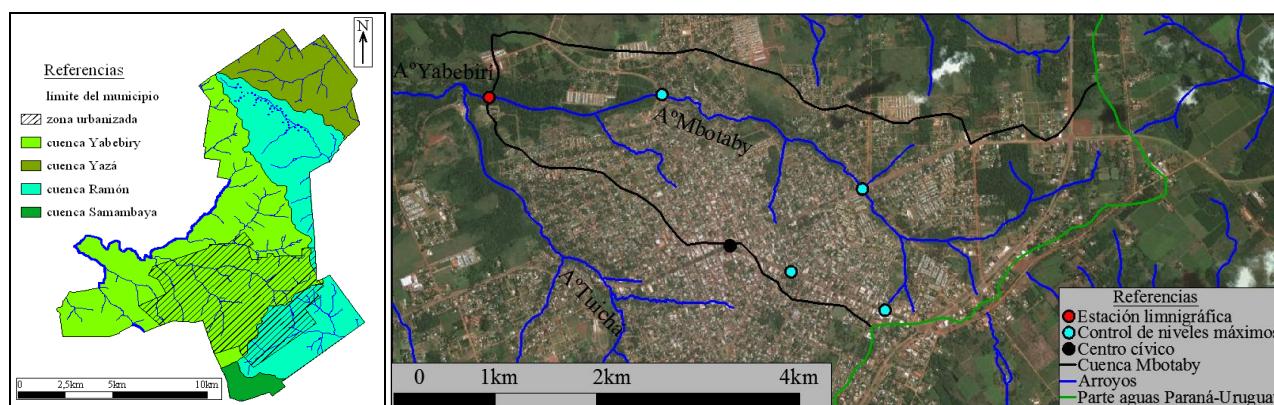
### 2.2 Ocupación y usos del suelo

Para la discretización de los usos del suelo se utilizaron simultáneamente cuatro procedimientos: revisión de la carta orgánica de la ciudad, evaluación por imagen satelital, comparación con investigaciones precedentes (Rodríguez et al., 2013b) y relevamiento in-situ de puntos particulares. En base a los procedimientos citados, se llevó a cabo la zonificación de la ocupación y usos del suelo, caracterizando cada clase mediante el conocido número de curva o CN (US-SCS, 1975). Los valores determinados de CN en condición II se presentan en Tabla 1. El valor de cada zona corresponde únicamente al área permeable de las mismas, en condiciones medias de humedad.

**Tabla 1** - Zonificación, área impermeable y CN en condición media adoptados.

| Zonificación                       | % de superficie impermeable | % de superficie impermeable directamente conectada | CN II |
|------------------------------------|-----------------------------|--|-------|
| Distrito central                   | 85                          | 90   | 74    |
| Residencial de densidad alta       | 65                          | 70   | 74    |
| Residencial de densidad media      | 45                          | 50   | 74    |
| Residencial de densidad baja       | 25                          | 30   | 74    |
| Loteos nuevos y zonas de intrusión | 5                           | 10   | 70    |
| Industrias                         | 25                          | 30   | 74    |
| Parques y canchas                  | 2,5                         | 5  | 70    |
| Reservas ecológicas                | 0                           | 0  | 66    |
| Rutas asfaltadas                   | 45                          | 50   | 74    |
| Ruta de tierra                     | 25                          | 30   | 70    |

En la Fig. 2.b se ilustra el estado de avance de la urbanización al año 2010 en la cuenca Mbotaby, junto con los cursos de agua.



**Figura 2.a** - Cuencas hídricas dentro del municipio Oberá. **b** - Cuenca del arroyo Mbotaby.

Puede alegarse que al año 2010 el grado de impermeabilización de la cuenca se valorizaba en un 24 % y al año 2013 el 60% de las calles de la cuenca Mbotaby cuentan con cordón cuneta de hormigón, con calles materializadas en pavimento flexible o empedrado tipo brasilero. El restante

de las calzadas son de tierra y las cunetas son excavadas en el mismo suelo.

### **3 CONSTITUCIÓN DEL MODELO HIDROLÓGICO-HIDRÁULICO**

#### **3.1 Implementación del SWMM**

La modelación hidrológica-hidráulica, para reproducir la dinámica de los procesos de generación y propagación de escurrimiento superficial, se llevó a cabo con el software SWMM (StormWater Management Model), con la versión 5.0vE, desarrollada por la National Risk Management Research Laboratory de Estados Unidos, traducida al español por Grupo Multidisciplinar de Modelación de Flujo de la Universidad Politécnica de Valencia y de uso gratuito (GMMF, 2005). Este software básicamente está constituido por un módulo hidrológico que permite llevar a cabo la transformación lluvia-caudal y un módulo hidrodinámico que permite propagar las crecidas generadas por los distintos elementos constitutivos de los sistemas de drenajes pluviales urbanos.

#### **3.2 Constitución y discretización de elementos componentes del sistema**

Con la intención de constituir y poner en funcionamiento operativo un modelo detallado, que permita calcular los tirantes de agua y velocidades desarrolladas en cada esquina, cordón cuneta, conductos y arroyos dentro de la cuenca, se llevó a cabo la constitución topológica con, al menos, 4 nodos en cada bocacalle (Fig. 3). Se desarrolló este nivel de detalle para poder establecer tanto los caudales que circulan a cada lado de las calles, como así también los niveles de agua en cada una de las cuatro esquinas de las bocacalles. En general, cada manzana está representada por una subcuenca tributaria que descarga en el nodo más alto de su perímetro. En los casos necesarios de ser representados por otra condición, se subdividieron las manzanas en dos o más subcuencas tributarias. La pendiente de todas las subcuencas se unificó en un valor de 5.5 %, la cual resulta como la pendiente promedio de la cuenca determinada a través del MDT.

Los nodos están conectados entre sí de diferentes formas. El conducto entre dos esquinas de una misma manzana está caracterizado por una media calle, con su respectiva vereda, cordón cuneta y media calzada, cada uno de estos con su rugosidad característica en función del material que lo compone y las obstrucciones esperables. En las cuatro esquinas de cada boca calle, los excedentes superficiales pueden ser conducidos hacia otro nodo por un cordón cuneta, atravesar la calle, ya sea por un badén o por desborde hacia las otras esquinas de la boca calle, donde el umbral de desborde está determinado por el galibo de la calle, o bien pueden ser conducidos hacia un conducto cerrado por vertido o mediante una boca de tormenta o sumidero. Si bien el software permite evaluar el funcionamiento de los sumideros a través de diferentes coeficientes de descarga y características recomendadas por el mismo, cada boca de tormenta fue cargada con su respectiva curva de descarga, determinada a través de ecuaciones desarrolladas en la bibliografía especializada, en función a sus verdaderas dimensiones y características (Riccardi, 2004).

#### **3.3 Áreas directa e indirectamente conectadas**

En la ciudad de Oberá, dada las prestaciones hidráulicas de la topografía y el suelo con cobertura vegetal, muchas viviendas descargan el flujo de los pisos y los techos a los patios con césped de las casas. Techos que, en gran número, no cuentan con canaletas, descargando directamente sobre los pisos y áreas verdes de los lotes. En función de este mecanismo interno de drenaje de los lotes, se estructuró cada unidad de aporte de la siguiente manera: (i) un determinado porcentaje del área impermeable total se consideró directamente conectado (AIDC) al sistema de desagües pluviales (Tabla 1), (ii) la superficie impermeable restante o no conectada (AINC) se consideró con descarga en las zonas permeables de los lotes y (iii) los excedentes de las zonas permeables (AP), una vez descontadas las pérdidas, son conducidos al sistema. La Fig. 4 muestra un ejemplo donde el 50 % de la superficie impermeable esta directamente conectada.

El ambiente de modelación resultó de una extensión superficial de 976.41 Ha, correspondiendo 24.5 % a áreas impermeables totales, de las cuales 12.9 % del total están directamente conectadas, y 75.5 % de áreas permeables. En resumen el modelo quedó constituido por 972 subcuencas tributarias, 2967 nodos y 3742 elementos conductores de los excedentes hídricos

(calles, cunetas, sumideros, zanjas, canales, conductos y arroyos).

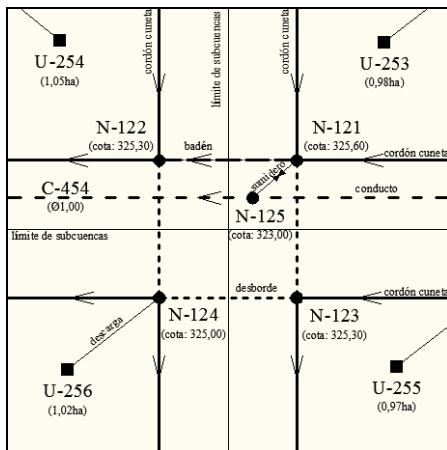


Figura 3 - Esquema del modelo en bocacalle.

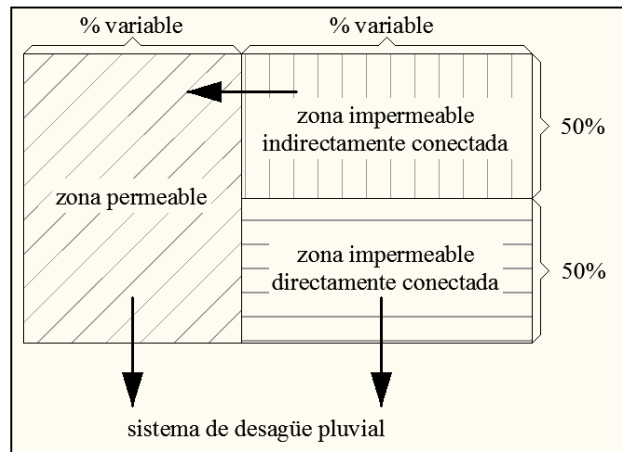


Figura 4 - Ejemplo de esquema de interacción entre las zonas permeables e impermeables en las subcuencas.

### 3.4 Bocas de tormenta y vertederos

Para la evaluación del flujo captado por las bocas de tormentas horizontales se utilizó el diagrama de gastos específicos en función del tirante de agua, desarrollado por UDFCD (1984) adaptado por Riccardi (2004) (Fig.5). Para las bocas de tormenta verticales se utilizaron las Ecuaciones 1 y 2 presentadas por Bertoni et al. (1995) citado por Riccardi (2004). En tanto que para las bocas de tormenta combinadas, con aberturas verticales y horizontales, los valores teóricos fueron afectados por un coeficiente de reducción del 65 % (UDFCD, 1984; citado por Riccardi, 2004). Los vertederos detectados en el sistema, fueron incorporados en el modelo como canales de hormigón de 0.15 m de longitud (espesor del cordón cuneta), con sus respectivos desniveles de entrada y salida. Se decidió confeccionarlos de esta manera debido a que se comportaban correctamente durante el flujo normal, desde las calles hacia los cursos de agua, y durante el desbordamiento de los arroyos, donde el flujo se produce desde estos hacia las cunetas de calles.

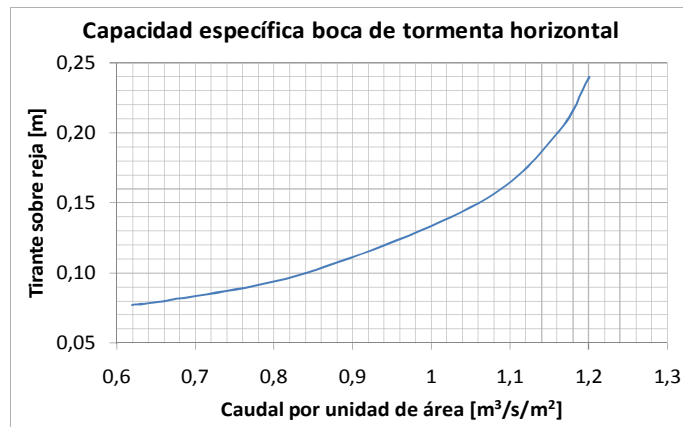


Figura 5 - Capacidad específica de una boca de tormenta horizontal. (UDFCD, 1984; adaptado por Riccardi, 2004).

$$Q = 1.656L \cdot y_0^{1.5} \rightarrow y_0 \leq 1.5h \quad (1)$$

$$Q = 0.67L \cdot h \left[ 2g \left( y_0 - \frac{h}{2} \right) \right] \rightarrow y_0 > 1.5h \quad (2)$$

Con: Q caudal [m³/s], L longitud [m],  $y_0$  tirante de agua [m] y  $h$  abertura [m] de la boca de tormenta.



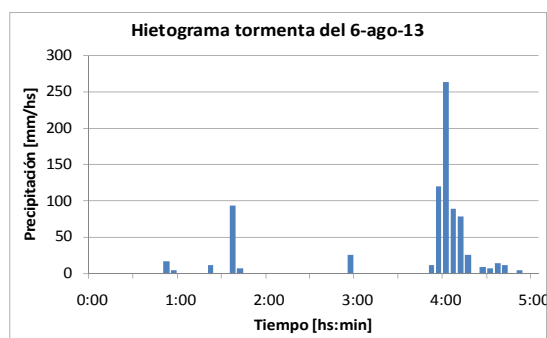
### 3.5 Calibración del modelo

Para la calibración del modelo se utilizaron los registros de cuatro eventos pluviográficos, los cuales se detallan en la Tabla 2. Los parámetros a calibrar fueron los coeficientes de resistencia empleados en las distintas superficies y elementos de conducción, como así también se verificó el número de curva para la determinación del escurrimiento neto. Los datos de precipitación fueron obtenidos por la estación meteorológica instalada en la Facultad de Ingeniería de la Universidad Nacional de Misiones (FIO, 2013), situada cercana al baricentro de la cuenca en estudio. Dicha estación cuenta con un pluviógrafo digital a canjilones, con una resolución en intervalos de hasta 1 minuto y 0.2 mm. Para la determinación del caudal erogado registrado se utilizó el limnigrama registrado y una relación H-Q determinada previamente en el punto de control de la cuenca (Fig. 2.b). Los niveles se obtuvieron por observación directa de las reglas limnimétricas instalada en el punto de control de la cuenca, obteniéndose lecturas cada 5 minutos. La condición de humedad antecedente en todos los eventos evaluados en la calibración fue considerada como media, empleándose el CN medio (Tabla 1).

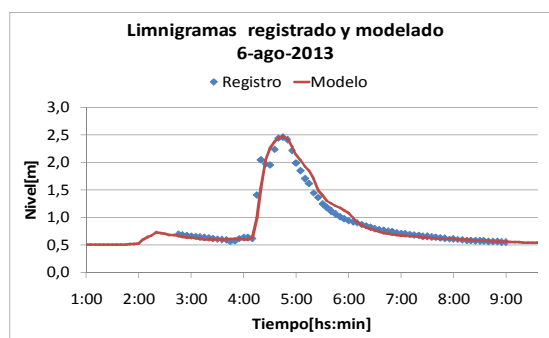
**Tabla 2** - Tormentas utilizadas para la calibración del modelo.

| <i>Fecha</i>           | <i>P. total</i> | <i>Duración</i> | <i>Diferencia vol. esc.</i> | <i>Diferencia nivel max.</i> |
|------------------------|-----------------|-----------------|-----------------------------|------------------------------|
| [dd-mmm-aa]            | [mm]            | [d:hs:min]      | [%]                         | [%]                          |
| 06-ago-13              | 66.6            | 0:04:05         | 1.5                         | 0.5                          |
| 23, 24, 25 y 26-ago-13 | 258.6           | 3:18:00         | 0.2                         | 0                            |
| 21-sep-13              | 25.6            | 0:05:15         | 3.1                         | sin registro                 |
| 21-oct-13              | 122.2           | 0:04:00         | 0.3                         | sin registro                 |

Como ejemplo, en las Fig. 6 y 7 se presenta el hietograma e hidrograma de la tormenta del 6-ago-13 donde se registro un evento con una precipitación total de 66,6 mm con una duración de 4 horas y 5 minutos, la misma muestra las intensidades de precipitación en intervalos de 5 minutos.



**Figura 6** - Hietograma tormenta del 6 de agosto de 2013.



**Figura 7** - Limnigramas registrado y modelado tormenta del 6 de agosto de 2013.

Seguidamente en la Tabla 3 se exhiben los coeficientes de rugosidad resultantes de la calibración para las distintas superficies de escurrimiento. A partir de los resultados de los eventos pluviográficos modelados en la calibración, se logró una aceptable reproducción de los niveles de agua en la sección de control de la cuenca y otros cuatro puntos característicos del interior de la misma (Fig. 2.b), donde fueron contrastados niveles máximos observados, arrojando valores aceptables con una diferencia inferior al 15 %.

Para un mejor ajuste del modelo y la correspondiente validación del mismo, es necesario continuar con los aforos, a fin de completar un mayor número de eventos con registros de precipitaciones y niveles tanto en la sección de control como en puntos internos.

**Tabla 3** - Coeficiente de Manning utilizados en las distintas superficies de escurrimiento.

| <b>Coeficientes de Manning utilizados [adm]</b> |                   |       |                  |                       |         |
|---|-------------------|-------|------------------|-----------------------|---------|
| Subcuencas                                      | Áreas permeable   | 0.100 | Calles de tierra | Calzada               | 0.040   |
|   | Áreas impermeable | 0.018 |                  | Cuneta                | 0.030   |
| Calles de pavimento flexible                    | Calzada           | 0.020 |                  | Conductos de hormigón | Veredas |
|   | Cuneta            | 0.018 | Zanjas de tierra |                       | Lecho   |
|   | Veredas           | 0.025 |                  | Arroyos               | Valle   |
| Calles de empedrado tipo brasilero              | Calzada           | 0.025 | Lecho            |                       | 0.035   |
|   | Cuneta            | 0.018 |                  |                       | Valle   |
|   | Veredas           | 0.025 |                  |                       |         |

#### **4 ELABORACIÓN DE MAPAS DE NIVELES Y VELOCIDADES MÁXIMAS MEDIANTE MODELACIÓN MATEMÁTICA HIDROLÓGICA-HIDRÁULICA**

Una vez calibrado el modelo de simulación, se procedió a su explotación enfocada a la elaboración de mapas de velocidades y niveles máximos alcanzados en las calles de todo el ambiente en estudio para tormentas de 2, 5 y 100 años de recurrencia. Primeramente se determinó la duración de la tormenta crítica. Para este tipo de análisis la tormenta crítica se define como aquella que genera caudales máximos lo suficientemente cercanos al máximo invariante y poseen una duración esperable en la región de estudio. Se seleccionaron dos elementos críticos del sistema para ser evaluados, la salida propiamente dicha de la cuenca Mbotaby y el tramo más comprometido de la calle Salta, donde suelen presentarse inundaciones menores, pero las aguas superficiales alcanzan altas velocidad. Se decidió así trabajar con tormentas críticas de 12 hs de duración, ya que las mismas producen caudales y tirantes cercanos a los máximos esperables (variación del orden del 2 %) y una duración mayor de la tormenta agregaría un tiempo de cálculo innecesario a la modelación y no aportará una apreciable precisión al cálculo. Con la duración de la tormenta establecida se confeccionaron tres hietogramas para 2, 5 y 100 años de recurrencia, utilizando el método de los bloques alternos (Riccardi, 2004) y las curvas I-D-R de la localidad de Cerro Azul (Litwin y Franco, 1987) distante unos 36 km de la ciudad de Oberá. Para 2 años de recurrencia son esperables 99.9 mm de precipitación total, con una intensidad media de 8.3 mm/hs y una intensidad máxima durante 5 minutos de 91 mm/hs. Para 5 años de recurrencia, el total precipitado esperable es de 125.8 mm, con una intensidad media de 10.5 mm/hs y una intensidad máxima de 101.8 mm/hs. En tanto que para 100 de recurrencia, obtenemos 201.2 mm totales precipitados, con una intensidad media de 16.8 mm/hs y 140.7 mm/hs durante los 5 minutos de mayor intensidad. Posteriormente se llevaron a cabo las respectivas corridas del modelo de simulación para determinar los niveles y velocidades en cada uno de los elementos constitutivos del sistema de drenaje pluvial en los que se constituyó el modelo.

##### **4.1 Resultados obtenidos**

Todas las corridas arrojaron errores de continuidad hidrológica e hidráulica menores al 1 %. El modelo permitió generar valores de tirante de agua, velocidad y caudal en todos los elementos del sistema de drenaje pluvial constituido. El paso de tiempo de cálculo que ha permitido verificar el menor error en continuidad fue de  $dt = 1$  seg. Para un adecuado seguimiento de los resultados obtenidos, una vez culminadas las simulaciones, los valores de tirantes, velocidades y caudales fueron impresos en archivos cada 1 min. Considerando los 2967 nodos y 3742 elementos con que se constituyó el ambiente modelado, el tiempo de cálculo aproximado de cada tormenta fue de 26 min. A partir de las simulaciones realizadas se obtuvieron, para cada recurrencia, dos mapas. Uno que detalla los niveles máximos alcanzados y otro similar con las velocidades máximas desarrolladas en las cunetas. Los 6 mapas obtenidos constituyen la respuesta de la cuenca ante una precipitación de 12 horas de duración, con 2, 5 y 100 años de recurrencia. Para una mejor

interpretación de los resultados, los mismos fueron discretizados en rangos para ser visualizados en los mapas. En los mapas de niveles máximos, el primer rango de valores, menos de 0.15 m, corresponde a aquellas cunetas que no presentan desborde por poseer tirantes de agua menores al nivel máximo de la cuneta. El segundo rango, entre 0.15 y 0.25 m, corresponde a aquellas calles cuyos niveles máximos presentan desborde de las cunetas e inundación parcial de las veredas. El rango siguiente, entre 0.25 y 0.50 m, corresponde a las calles donde el agua ha inundado las calzadas, la totalidad de las veredas e ingresado a los lotes de viviendas y comercios. Los próximos rangos de valores son para evaluar la severidad de la inundación en aquellas zonas más afectadas. En la Tabla 4 se presentan los porcentajes de cantidad de cunetas comprendida dentro de cada rango de valores para cada recurrencia. De dichas figuras y tabla puede concluirse que son significativas las cunetas que desbordan afectando veredas y lotes con viviendas y comercios. En los mapas de velocidades máximas, el rango menor representa las cunetas que alcanzan velocidades menores a 1 m/s y los rangos siguientes presentan valores que se incrementan en 1 m/s cada uno. El mayor de los rangos representa las cunetas donde se alcanza velocidades mayores a los 4 m/s. En la Tabla 5 se presentan los porcentajes de velocidades máximas alcanzadas dentro de cada rango de valores para cada recurrencia.

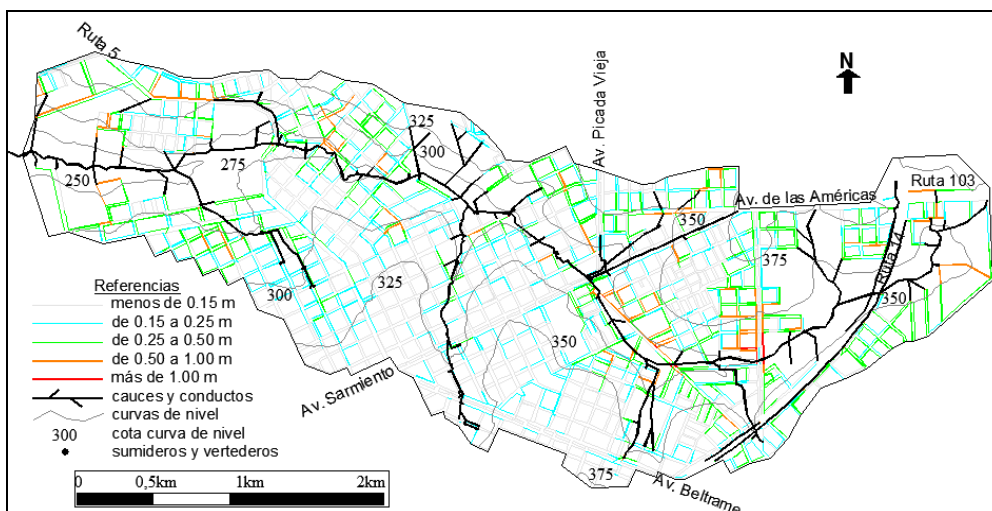
**Tabla 4 - Porcentajes de niveles máximos**

| Niveles máximos (m) | Años de recurrencia |       |       |
|---------------------|---------------------|-------|-------|
|                     | 2                   | 5     | 100   |
| menos de 0.15       | 74.3%               | 66.7% | 50.7% |
| de 0.15 a 0.25      | 17.8%               | 20.0% | 24.6% |
| de 0.25 a 0.50      | 7.0%                | 11.5% | 18.7% |
| de 0.50 a 1.00      | 0.8%                | 1.8%  | 5.7%  |
| más de 1.00         | 0.0%                | 0.0%  | 0.2%  |

**Tabla 5 - Porcentajes de velocidades máximas**

| Velocidades máximas (m/s) | Años de recurrencia |       |       |
|---------------------------|---------------------|-------|-------|
|                           | 2                   | 5     | 100   |
| menos de 1                | 63.7%               | 59.4% | 53.4% |
| de 1 a 2                  | 31.5%               | 34.4% | 35.7% |
| de 2 a 3                  | 4.3%                | 5.5%  | 9.6%  |
| de 3 a 4                  | 0.5%                | 0.6%  | 1.2%  |
| más de 4                  | 0.0%                | 0.1%  | 0.2%  |

A modo ilustrativo en la Fig. 8 se presentan los mapas de niveles máximos alcanzados en las cunetas de la cuenca en estudio para 100 años de recurrencia.



**Figura 8 - Niveles máximos en cunetas de calles para 100 años de recurrencia.**

Puede visualizarse las importantes velocidades alcanzadas en las cunetas de la cuenca, velocidades que se desarrollan en toda la cuenca. Aún para una reducida recurrencia las cunetas con velocidades mayores a 1 m/s casi alcanzan el 40 % del total de cunetas de la cuenca. Para 100 años de recurrencias las velocidades máximas alcanzadas superan los 4 m/s. En la Fig. 9 se visualiza el mapa con las velocidades máximas alcanzadas para 100 años de recurrencia.

De la comparación entre los mapas de niveles y velocidades máximas surgen 7 zonas dentro de la cuenca que se destacan por alcanzar grandes valores de niveles y velocidades en las calles (Fig. 10 y Tabla 6). En ellas las calzadas, veredas y lotes se ven afectados severamente, por la presencia de



tirantes mayores al máximo admitido por la cuneta, en combinación con velocidades capaces de arrastrar objetos y personas. Las zonas son: (1) Calle Salta entre Sargento Cabral y French; (2) Esquina de las calles Urquiza y San Luis; (3) Calle Polonia entre Yaguareté y Dos de mayo; (4) Calle Primeros colonizadores entre Suecia y Matheu; (5) Av. de las América y el cruce del arroyo Mbotaby; (6) Av. J. D. Perón y el cruce del arroyo Mbotaby; y (7) Av. Gendarmería Nacional y el cruce del arroyo Mbotaby.

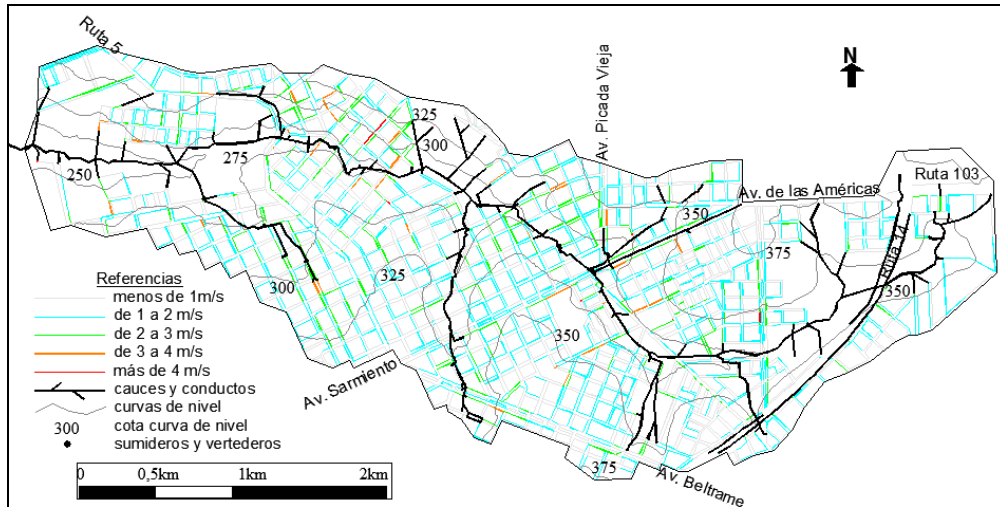


Figura 9 - Velocidades máximas en cunetas de calles para 100 años de recurrencia.

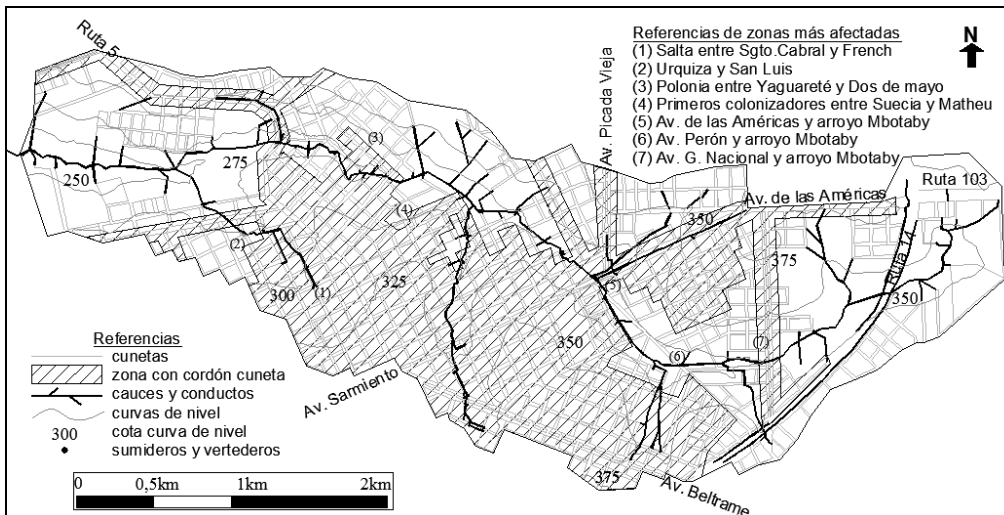


Figura 10 - Mapa de zonas más afectadas por inundación de las calles de la cuenca Mbotaby.

Tabla 6 - Resumen de niveles y velocidades máximas en las zonas más afectadas.

| Zonas | Niveles máximos [m] |             |             | Velocidades máximas [m/s] |             |             |
|-------|---------------------|-------------|-------------|---------------------------|-------------|-------------|
|       | Años de recurrencia |             |             | Años de recurrencia       |             |             |
|       | 2                   | 5           | 100         | 2                         | 5           | 100         |
| 1     | 0.27                | 0.29        | 0.36        | 3.26                      | 3.44        | 3.78        |
| 2     | 0.35                | 0.41        | 0.65        | 1.55                      | 2.24        | 2.85        |
| 3     | 0.20                | 0.28        | 0.35        | 2.96                      | 3.50        | 4.10        |
| 4     | <b>0.62</b>         | <b>0.68</b> | 0.82        | 3.24                      | 3.55        | 4.16        |
| 5     | 0.45                | 0.56        | 0.75        | 3.27                      | 3.93        | 3.96        |
| 6     | 0.56                | 0.65        | <b>1.24</b> | 1.80                      | 2.56        | 3.25        |
| 7     | 0.55                | 0.62        | 1.14        | <b>3.55</b>               | <b>4.05</b> | <b>4.27</b> |

## 5 CONCLUSIONES

A los efectos de describir la dinámica del escurrimiento superficial en las calles en un ambiente físico urbano donde se desarrollan intensas precipitaciones se ha llevado a cabo el desarrollo y aplicación de una metodología basada en la simulación hidrológica-hidráulica de escurrimiento a superficie libre. El modelo SWMM 5.0vE utilizado para la modelación ha mostrado un comportamiento satisfactorio para modelar este tipo de escenarios. Se ha logrado constituir el modelo con una densidad de 7.9 elementos/Ha. Respecto a los niveles máximos calculados en las cunetas de las calles puede concluirse que para una recurrencia de 2 años, más del 25% de las cunetas se ven desbordadas afectando veredas y lotes, con niveles máximos que superan los 0.5 m de altura, representando una alta frecuencia de ocurrencia para esta recurrencia de lluvia. Para 5 años de recurrencia el porcentaje de cunetas desbordadas asciende al 43 %, con un 11.5 % de lotes afectados. Mientras que para 100 años de recurrencia, casi alcanzan el 50 % las cunetas desbordan, con un 18.7 % de cunetas que afectan lotes con viviendas y comercios y valores máximos que superan el metro de altura. En lo que concierne a velocidades, para una recurrencia de 2 años, el 36.3 % de las cunetas desarrollan velocidades mayores a 1 m/s, con valores máximos que superan los 3 m/s, lo que representa una alta amenaza de afectación por arrastre con una frecuencia muy alta. Para 5 años de recurrencia el porcentaje de cunetas con velocidades mayores a 1 m/s asciende a más del 40 %, con velocidades que superan los 4 m/s. En tanto que para 100 años de recurrencia, el 46.6 % de las cunetas presentan velocidades máximas superiores a 1 m/s. Se comprueba que en cuencas como la de estudio, la evaluación por amenazas de inundación en calles se rige por la combinación de niveles y velocidades alcanzados simultáneamente, situación que facilita el arrastre de personas y animales, como la destrucción parcial de vehículos y construcciones.

## BIBLIOGRAFÍA

- CELO 2013, Cooperativa Eléctrica Limitada Oberá. Comunicación interna.
- Google Earth ©, 2013, Imagen de 3 de mayo de 2010. [www.googleearth.com](http://www.googleearth.com).
- FIO, 2013. Facultad de Ingeniería de Oberá, Universidad Nacional de Misiones. Datos de la estación meteorológica.
- GMMF, 2005. Grupo Multidisciplinar de Modelación de Flujo, Manual del usuario del SWMM 5.0 vE. Universidad Politécnica de Valencia. 244p.
- Litwin C. y Franco P., 1987. Estudio Hidrológico e Hidráulico de Tributarios del Río Paraná en el Tramo Comprendido entre el Río Iguazú y la Sección Encarnación – Posadas. Informe para la Comisión mixta argentino – paraguaya (COMIP). CABA, 245p.
- Mezher R., Mercuri P. y Pizarro M., 2008. Mapa de precipitación anual en la República Argentina, Serie 1971-2000. INTA CABA, Argentina.
- Olinuk J., 1998. El clima en la localidad de Cerro Azul, período 1967 – 1996. Estación experimental agropecuaria INTA Cerro Azul. Informe técnico N° 68, ISSN 0326-0135. Posadas, Misiones. 73p.
- Riccardi G., 2004. Hidrología en medios antropizados. Libro electrónico. CURIHAM, FCEIA-UNR. <http://c-virtual.fceia.unr.edu.ar>.
- Rodriguez T., Reinert H., Ruberto A., Gomez M. y Berger E., 2013a. Urbanización e impacto hidrológico en una cuenca de alta pendiente del centro de Misiones. CD actas CONAGUA 2013. San Juan. 12p.
- Rodriguez T., Reinert H., Ruberto A., Gomez M., Aguirre M. y Aguirre A., 2013b. Instrumentación y modelación hidrológica superficial de una cuenca urbana de alta pendiente del centro de Misiones. CD actas CONAGUA 2013. San Juan. 12p.
- U.S. Soil Conservation Service, 1975. Urban Hydrology for Small Watersheds, Technical Release No. 55, SCS-USDA, Washington, D.C.