

Análisis de riesgo de inundación mediante modelación de escurrimiento en zona urbana de la ciudad de Oberá, Misiones

Tomás Rodríguez¹, Gerardo Riccardi^{2,3} y Alejandro Ruberto⁴

¹ 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.

² 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.

³ Consejo de Investigaciones de la Universidad Nacional de Rosario.

⁴ Grupo de Investigación del Departamento de Hidráulica, Facultad de Ingeniería, Universidad Nacional del Nordeste (UNNE), Las Heras 727, (3500) Resistencia, Chaco.

E-mail: rodriguezdt@fio.unam.edu.ar

RESUMEN: Las ciudades de la zona centro de Misiones presentan aún grandes zonas verdes y superficies permeables dentro de las áreas urbanas. Poseen topografía escarpada, la cual en conjunto con las prestaciones de retención al escurrimiento de los estratos de la selva Paranaense y el suelo limo-arcilloso que poseen, han contribuido a la reducción de los excedentes hídricos superficiales y a su veloz evacuación, reduciendo los inconvenientes por inundación. Sin embargo, dichas ciudades comienzan a evidenciar el aumento de niveles y velocidades máximas en las calles, desencadenado por el avance de la urbanización sobre dichas áreas verdes. En particular, en la ciudad de Oberá, y a los efectos de contar con una herramienta que permita la descripción del escurrimiento superficial, se ha constituido, calibrado y actualmente se explota un modelo hidrológico-hidráulico de la cuenca del arroyo Mbotaby, la cual con 976 Ha de área de aporte y 24 % de impermeabilidad, recibe 40 % de los desagües pluviales de la ciudad. Dicho modelo ha sido utilizado para determinar el riesgo de inundación en calles para distintas recurrencias en un escenario actual de la cuenca. En este trabajo se persigue como objetivo valorar dicho riesgo por inundación, ante un posible escenario futuro donde se alcancen los máximos valores de impermeabilidad impuestos por el actual código de edificación municipal dentro del área de captación de la cuenca en estudio. Como resultado se obtuvieron mapas de niveles hidrométricos y velocidades máximas para 2, 5 y 100 años de recurrencia para un posible escenario futuro, donde se asume alcanzar un 45 % de superficies impermeables. Los escenarios futuros indican un leve aumento del caudal máximo en el punto de control de la cuenca y un significativo aumento, tanto del volumen total erogado por la cuenca, como de los niveles máximos en las distintas calles respecto al escenario actual.

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 evidencian por ejemplo los eventos registrados en la ciudad de Oberá el día 1 de diciembre de 2012, donde 276 mm se precipitaron en tan solo 12 horas y el del 19 del mismo mes en la ciudad de Posadas, con 206 mm caídos en 6 h.

Geográficamente, Misiones está situada fuera de la gran llanura chaco-pampeana que domina la Mesopotamia, perteneciendo orográficamente a la región montañosa del Brasil meridional. Además de tener una descendencia geológica, la meseta central de Misiones es un ramal de sistema orográfico Serra Geral de Brasil (Hausen, 1919). El territorio provincial es una meseta rocosa, cuyo relieve es considerado una transición entre la orografía brasileña y las planicies argentinas. Hacia el Sur de la provincia el paisaje se torna paulatinamente llano, el terreno va descendiendo lentamente hasta volverse una zona de llanura.

Misiones presenta la característica de pertenecer a dos grandes sistemas de ríos, ya que la Sierra Central de Misiones es el parteaguas que divide las cuencas del Paraná y Uruguay. Dado los niveles del terreno y las profundidades de los suelos residuales, la erosión ha creado formas topográficas muy accidentadas donde los ríos y arroyos han cavado su cauce en el suelo, conformando lechos profundos.

La ciudad de Oberá, se encuentra ubicada en la zona centro de la provincia de Misiones, en la intersección de las Rutas Nacional 14 y Provincial 105 (Figura 1.a y b). Dentro de los límites del municipio se determinó, mediante la utilización de un modelo digital de terreno (SRTM, 2009) que el 47 % de la superficie presenta pendientes topográficas mayores a 5 %, con valores máximos que superan el 20 %. Posee un módulo pluviométrico anual de 1925mm (CELO, 2013) y 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.

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 95 % de la zona urbanizada del municipio vierte sus aguas en subcuencas pertenecientes a la cuenca del río Paraná, mientras que el 5 % restante lo hace hacia el río Uruguay. Producto de investigaciones precedentes, se cuenta en la ciudad de Oberá con un modelo hidrológico-hidráulico de una de las principales subcuencas del sistema de desagües pluviales, la cuenca del arroyo Mbotaby, el cual recibe 40 % de los excedentes hídricos superficiales urbanos de la ciudad. Mediante la utilización de registros de hietogramas de precipitación y los limnigramas generados en el punto de control de la cuenca se logró una aceptable calibración del mismo, desarrollándose así una herramienta capaz de describir la dinámica del escurrimiento

superficial en una región urbana con gran cantidad de áreas verdes (24 % de impermeabilidad total) y elevadas pendientes topográficas (pendiente media de la cuenca 5.5 %).



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

El modelo implementado en el entorno del SWMM 5.0ve (GMMF, 2005), ha sido utilizado anteriormente para evaluar el actual riesgo por inundación en las calles dentro de la cuenca. Mapas de niveles y velocidades máximas en cunetas de calles fueron confeccionados con el fin de detectar la zonas más comprometidas por alcanzar niveles de desborde y velocidades capaces de arrastrar objetos.

El presente trabajo tuvo como objetivo evaluar el riesgo por inundación en las calles de la cuenca Mbotaby ante un posible escenario futuro, donde se alcance el máximo de superficies construidas impuestos por el actual Código de Edificación Municipal (CEM) de la ciudad de Oberá. Para la evaluación del riesgo 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. De la comparación de mapas de riesgo del escenario actual y futuro posible surge el análisis del impacto hidrológico esperable debido a la dinámica de la urbanización en caso de mantenerse el actual código de edificación.

LA CUENCA DEL ARROYO MBOTABY

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 (Figura 2). Dicho

arroyo recibe, aproximadamente, 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.

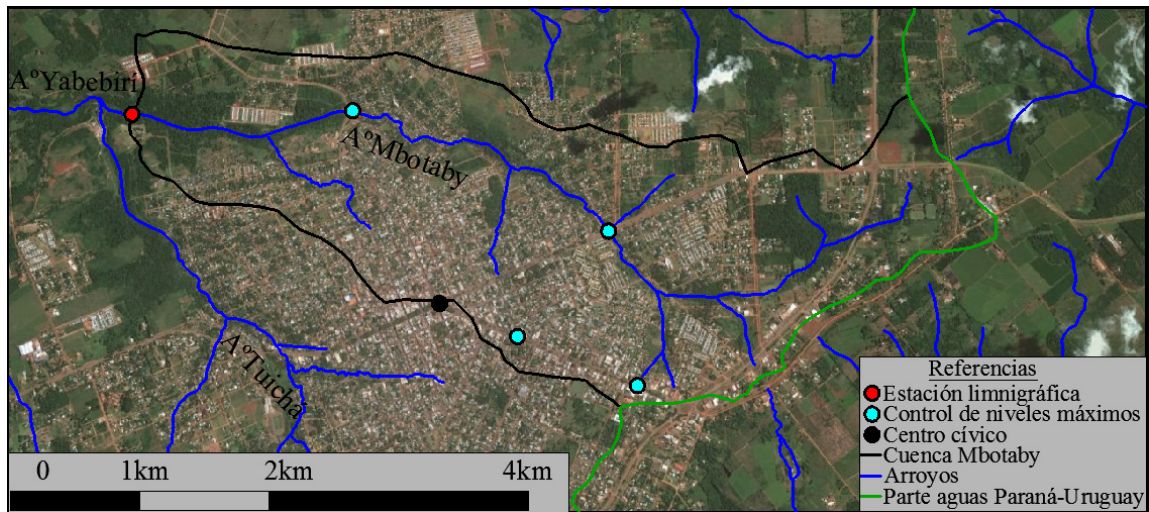


Figura 2.- Cuenca del arroyo Mbotaby.

Ocupación y usos del suelo actual

Para la clasificación 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 la Tabla 1. El valor de cada zona corresponde únicamente al área permeable de las mismas, en condiciones medias de humedad.

Puede alegarse que al año 2010 el grado de impermeabilización de la cuenca se valorizaba en 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 escavadas en el mismo suelo.

Escenario futuro hipotético

Para establecer un posible escenario futuro, donde la presión urbanística avance sobre los actuales espacios permeables dentro de la cuenca, se estableció en los lotes particulares una superficie impermeable igual al máximo de superficie construida permitido por el CEM vigente, según las distintas zonificaciones.

Es de hacer mención aquí que el CEM no limita las superficies impermeables que pueden haber dentro de los lotes, sino que impone restricciones a las superficies cubiertas mediante el Factor de Ocupación del Suelo (FOS). Según este código el FOS está determinado por la suma de superficies cubierta, las cuales son consideradas como tal aquella que posee cubierta de techo y cerramientos verticales en al menos tres direcciones, mientras que si posee cerramiento en dos o menos direcciones es una superficie semicubierta y su incidencia en el FOS será multiplicado por 0.5. Por lo que es esperable que las superficies impermeables totales sean superiores al FOS establecido como máximo en el código, tanto por las superficies semicubiertas, como por los pisos impermeables que no poseen limitación.

Asimismo, dada la manera en que está constituido el modelo hidrológico, es necesario contemplar en cada subcuenca, el porcentaje de impermeabilización que corresponde a la media calle, es decir a su media calzada y vereda correspondientes. Si consideramos a las calzadas como impermeables en un 98 % y a las veredas impermeabilizadas en un porcentaje igual al FOS, según la zonificación en la que se encuentre, en promedio tenemos un incremento del 5 % en la impermeabilidad de las subcuencas.

Para este posible escenario futuro las superficies impermeables de las zonas del distrito central, residenciales, nuevos loteos e industrias fueron supuestas igual a los FOS máximos más un 5 % debido a la incidencia de las calles; las actuales rutas de tierra consideradas como asfaltas con 45 % de impermeabilidad; y las actuales rutas asfaltadas, parques y reservas ecológicas conservan su actuales porcentajes de impermeabilidad. Para este escenario la totalidad de las superficies impermeables fueron consideradas como directamente conectadas y el CN de las superficies permeables son iguales a las condiciones actuales salvo para las actuales rutas terradas (Tabla 1).

En este posible escenario futuro se consideraron que las actuales calzadas de tierra alcanzaron a ser materializadas en pavimento tipo empedrado brasilero, con cordones cunetas de hormigón y las actuales calzadas de pavimento brasilero recibieron un tratamiento superficial bituminoso, comportándose como calzadas de pavimento flexible.

CONSTITUCIÓN DEL MODELO HIDROLÓGICO-HIDRÁULICO

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 (Storm Water 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.

Tabla 1.- Zonificación, área impermeable y CN adoptados para el escenario actual y el posible escenario futuro.

Zonificación	Escenario actual			Escenario futuro		
	% sup. imp.	% sup. imp. DC	CN II	% sup. imp.	% sup. imp. DC	CN II
Distrito central	85	90	74	85	100	74
Residencial de densidad alta	65	70	74	75	100	74
Residencial de densidad media	45	50	74	65	100	74
Residencial de densidad baja	25	30	74	55	100	74
Loteos nuevos y zonas de intrusión	5	10	74	50	100	74
Industrias	25	30	74	60	100	74
Parques y canchas	2,5	5	70	2,5	100	70
Reservas ecológicas	0	0	66	0	100	66
Rutas asfaltadas	45	50	74	45	100	74
Ruta de tierra	25	30	70	45	100	74

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 llevo a cabo la constitución topológica con, al menos, 4 nodos en cada bocacalle (Figura 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. Las pendientes de todas las subcuencas se unificaron 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 bocacalle, 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 bocacalle, donde el umbral de desborde está determinado por el gálibo 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).

Áreas directa e indirectamente conectadas

En Oberá, dada las prestaciones hidráulicas de la topografía y el suelo con cobertura vegetal, muchas viviendas descargan el flujo de los pisos y 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 Figura 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.

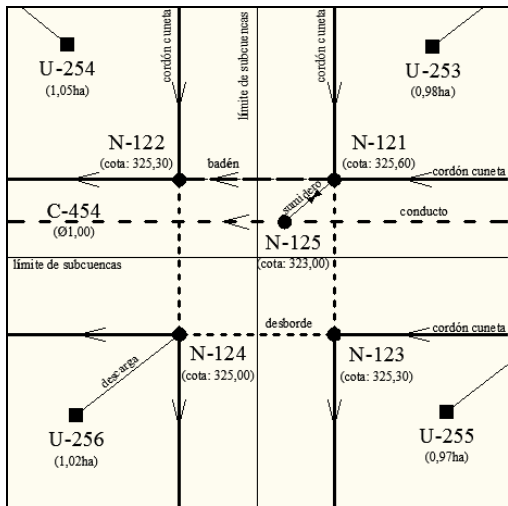


Figura 3.- Esquema del modelo en bocacalle.

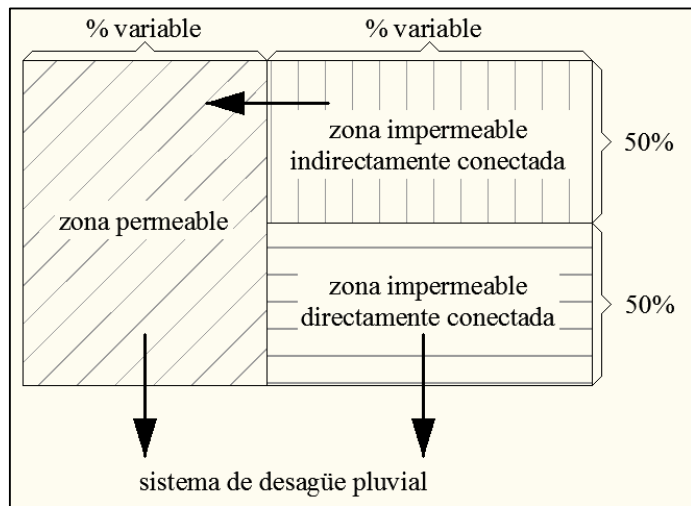


Figura 4. - Ejemplo de esquema de interacción entre las zonas permeables e impermeables en las subcuencas.

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).

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) (Figura 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 de 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.

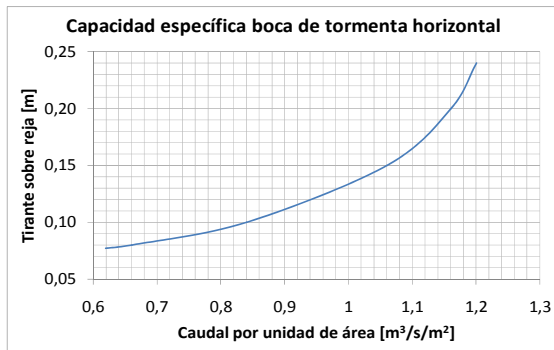


Figura 5.- Capacidad específica de una boca de tormenta horizontal. (UDFCD, 1984; adaptado por Riccardi, 2004).

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

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

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

Calibración del modelo

Para la calibración del modelo se utilizaron los registros de cuatro eventos pluviográficos. 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 (Figura 2). 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).

Seguidamente en la Tabla 2 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 (Figura 2), donde fueron contrastados niveles máximos observados, arrojando valores aceptables con una diferencia inferior al 15 %.

Tabla 2.- Coeficiente de Manning utilizados en las distintas superficies de escurrimiento.

Coeficientes de Manning utilizados [adm]					
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		Veredas	0.050
	Cuneta	0.018	Conductos de hormigón		0.015
	Veredas	0.025	Zanjas de tierra	Lecho	0.030
Calles de empedrado tipo brasilero	Calzada	0.025		Valle	0.100
	Cuneta	0.018	Arroyos	Lecho	0.035
	Veredas	0.025		Valle	0.075

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.

Tormenta critica

Primeramente se determino 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 h 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 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/h y una intensidad máxima durante 5 minutos de 91 mm/h. Para 5 años de recurrencia, el total precipitado esperable es de 125.8 mm, con una intensidad media de 10.5 mm/h y una intensidad máxima de 101.8 mm/h. En tanto que para 100 de recurrencia, obtenemos 201.2 mm totales precipitados, con una intensidad media de 16.8 mm/h y 140.7 mm/h 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 del desagüe pluvial en los que se constituyó el modelo.

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 un segundo.

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. En la Tabla 3 se presenta un resumen con los resultados de las corridas con datos del balance hidrológico, valores de caudales y niveles máximos en el punto de control de la cuenca, como así también el tiempo que permanece desbordado el arroyo en dicho punto, teniendo presente que el mismo se produce para un nivel de agua de 1.80 m.

A partir de las simulaciones realizadas y con el fin de representar la espacialidad de las modificaciones se construyeron, para cada recurrencia y escenario, dos tipos de mapas. El primer tipo de mapas corresponde a los niveles máximos alcanzados en tanto que el segundo tipo de mapas corresponde a las velocidades máximas desarrolladas en las cunetas. Las respuestas de la cuenca corresponden a una precipitación extrema determinada a partir de las relaciones IDR existentes 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 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 zonas más afectadas.

Tabla 3.- Síntesis de resultados obtenidos para los dos escenarios y distintas recurrencias.

Recurrencia	Parámetro	Unidades	Escenario actual	Escenario futuro	Variación
2 AÑOS	Caudal máximo	[l/s]	69057	72679	5.2 %
	Nivel máximo	[m]	2.48	2.51	1.2 %
	Tiempo al pico	[h:mm]	6:45	6:50	0:05
	Tiempo de desborde	[h:mm]	1:40	1:50	0:10
	Precipitación total	[mm]	99.87	99.87	0.0 %
	Infiltración	[mm]	40.43	29.11	-28.0 %
	Precipitación en exceso	[mm]	54.45	68.85	26.4 %
	Almacenamiento	[mm]	5.05	1.95	-61.4 %
5 AÑOS	Caudal máximo	[l/s]	75595	78417	3.7 %
	Nivel máximo	[m]	2.54	2.57	1.2 %
	Tiempo al pico	[h:mm]	7:00	7:05	0:05
	Tiempo de desborde	[h:mm]	2:20	2:40	0:20
	Precipitación total	[mm]	125.8	125.8	0.0 %
	Infiltración	[mm]	44.58	32.18	-27.8 %
	Precipitación en exceso	[mm]	76.22	91.74	20.4 %
	Almacenamiento	[mm]	5.06	1.96	-61.3 %
100 años	Caudal máximo	[l/s]	103573	104464	0.9 %
	Nivel máximo	[m]	2.79	2.8	0.4 %
	Tiempo al pico	[h:mm]	7:30	7:35	0:05
	Tiempo de desborde	[h:mm]	4:30	5:00	0:30
	Precipitación total	[mm]	201.27	201.27	0.0 %
	Infiltración	[mm]	52.42	37.79	-27.9 %
	Precipitación en exceso	[mm]	143.86	161.36	12.2 %
	Almacenamiento	[mm]	5.07	2.14	-57.8 %

En la Tabla 4 se presentan los porcentajes de cunetas de calle alcanzadas por cada rango de niveles para los dos escenarios analizados y las distintas recurrencias. A modo ilustrativo en la Figura 6 se presenta el mapa de niveles máximos para el posible escenario futuro en las cunetas de la cuenca en estudio para 100 años de recurrencia. De dichas figuras y tabla puede concluirse que son significativas las cunetas que desbordan afectando veredas y lotes con viviendas y comercios.

Tabla 4.- Porcentajes de niveles máximos en cunetas para los dos escenarios y distintas recurrencias.

Niveles máximos	2 años de recurrencia			5 años de recurrencia			100 años de recurrencia		
	actual	futuro	variación	actual	futuro	variación	actual	futuro	variación
menos de 15 cm	74.3 %	66.0 %	-8.3 %	66.7 %	61.3 %	-5.4 %	50.7 %	46.9 %	-3.9 %
de 15 a 25 cm	17.8 %	20.0 %	2.1 %	20.0 %	20.5 %	0.5 %	24.6 %	26.2 %	1.5 %
de 25a 50 cm	7.0 %	11.4 %	4.3 %	11.5 %	14.4 %	3.0 %	18.7 %	20.2 %	1.5 %
de 50 a 100 cm	0.8 %	2.7 %	1.9 %	1.8 %	3.6 %	1.8 %	5.7 %	6.4 %	0.7 %
más de 100 cm	0 %	0 %	0 %	0 %	0.1 %	0.1 %	0.2 %	0.3 %	0.1 %

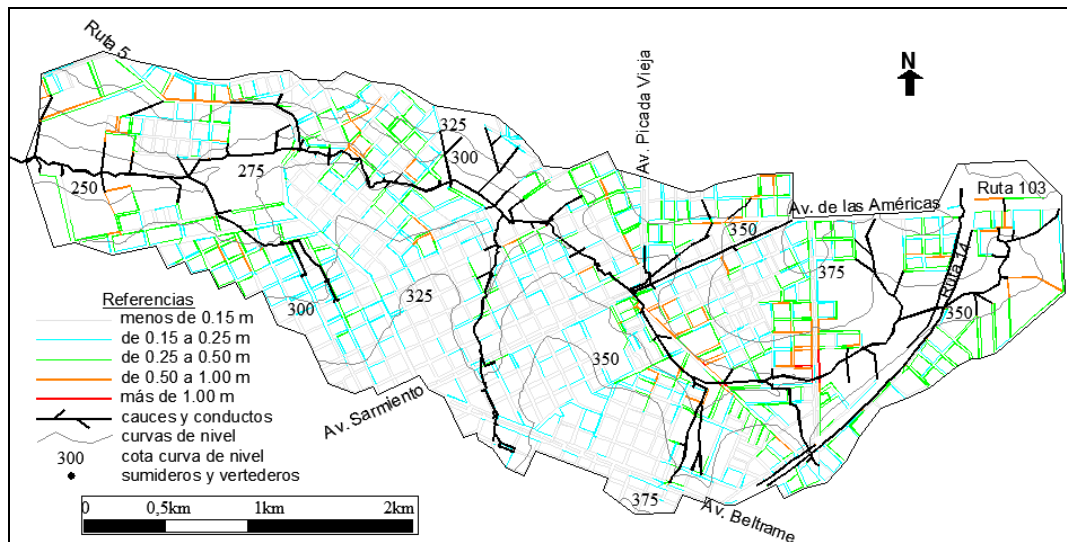


Figura 6.- Niveles máximos en cunetas de calles para el posible escenario futuro con 100 años de recurrencia.

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. 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 Figura 7 se presenta el mapa de velocidades máximas para el posible escenario futuro en las cunetas de la cuenca Mbotaby para 100 años de recurrencia.

Tabla 5.- Porcentajes de velocidades máximas en cunetas para los dos escenarios y distintas recurrencias.

Velocidades máximas	2 años de recurrencia			5 años de recurrencia			100 años de recurrencia		
	actual	futuro	variación	actual	futuro	variación	actual	futuro	variación
menos de 1 m/s	63.7 %	59.8 %	-3.9 %	59.4 %	57.6 %	-1.8 %	53.4 %	48.7 %	-4.7 %
de 1 a 2 m/s	31.5 %	33.5 %	2.0 %	34.4 %	34.3 %	-0.1 %	35.7 %	38.4 %	2.7 %
de 2 a 3 m/s	4.3 %	5.9 %	1.6 %	5.5 %	7.1 %	1.6 %	9.6 %	11.2 %	1.6 %
de 3 a 4 m/s	0.5 %	0.7 %	0.1 %	0.6 %	0.7 %	0.2 %	1.2 %	1.3 %	0.2 %
más de 4 m/s	0 %	0.1 %	0.1 %	0.1 %	0.2 %	0.2 %	0.2 %	0.4 %	0.2 %

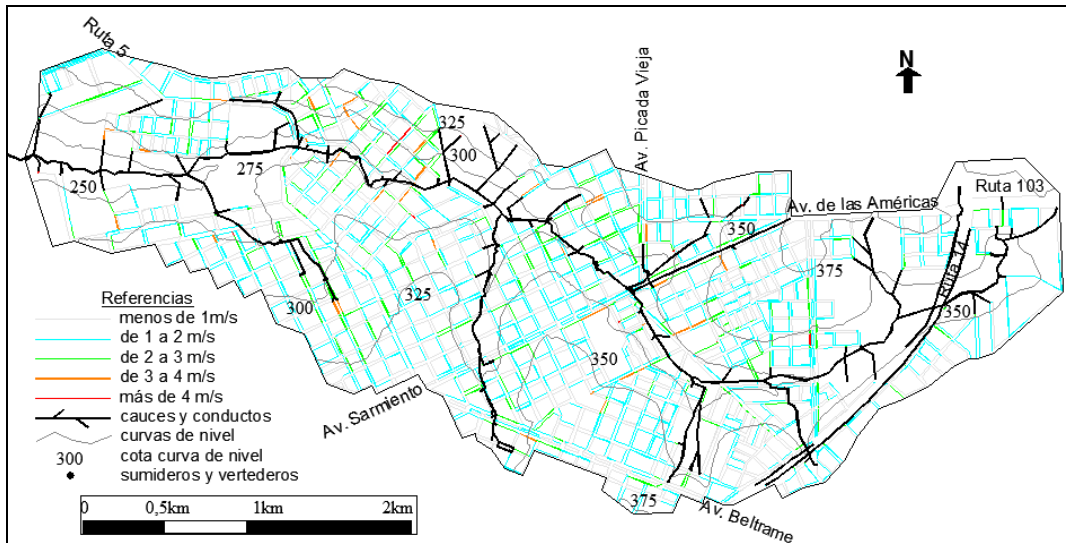


Figura 7.- Velocidades máximas en cunetas de calles para el posible escenario futuro y 100 años de recurrencia.

CONCLUSIONES

El modelo SWMM 5.0vE utilizado para la modelación ha mostrado poseer un interfaz sencilla para la modificación de los parámetros que rigen la respuesta de la cuenca ante distintos escenarios.

Referente a la comparación de los balances hidrológicos de los dos escenarios planteados, la mayor variación se verifica en el almacenamiento de agua dentro de la cuenca, seguido por la modificación en el volumen infiltrado, en tanto que la menor modificación se verifica en el exceso de precipitación. Todas las modificaciones se originan en el aumento de la impermeabilidad de la cuenca, observándose las mayores variaciones porcentuales de los procesos hidrológicos para menores recurrencias.

El escenario actual de la cuenca Mobotaby presenta 24 % de impermeabilidad, índice relativamente bajo para un área urbana; y para el posible escenario futuro, donde las superficies impermeables sean iguales a las máximas superficies cubiertas permitidas por CEM vigente, la impermeabilidad de la cuenca alcanzaría 45 %, con subcuencas que llegarían al 90 % en el centro de la ciudad.

Aún para el posible escenario futuro el porcentaje total de áreas permeables se presenta como significativo, representando el 55 % de las superficies. Esto se debe en gran medida a las áreas verdes que posee la ciudad, como plaza y reservas ecológicas. Situación que realza la importancia de conservar dichas áreas zonas impidiendo el loteo y urbanización de las mismas frente a la presión urbanística.

Respecto a los niveles máximos calculados en las cunetas de las calles puede concluirse que para una recurrencia de 2 años el porcentaje de cunetas desbordadas pasa de 26 % en el escenario actual a 34 % en el posible escenario futuro, representando una alta frecuencia de ocurrencia para esta recurrencia de lluvia. Para 5 años de recurrencia las cuentas desbordadas pasan de 33 % a 39 %. Y para una recurrencia de 100 años las cunetas desbordadas pasan de 48 % a 53 %.

En lo que concierne a velocidades máximas, para una recurrencia de 2 años, las cunetas con que desarrollan velocidades mayores a 1m/s pasan de 36 % en el escenario actual a 40 % en el posible escenario futuro. Para una recurrencia de 5 años las cunetas con velocidades máximas mayores a 1 m/s pasan de 41 % a 42 %. Y para una recurrencia de 100 años los porcentajes varían de 47 % a 51 %.

Dado que en cuencas como la de estudio, con elevadas pendientes, la evaluación riesgo por inundación en calles se rige por la combinación de niveles de desborde y altas velocidades alcanzados simultáneamente, se observa un aumento del riesgo por inundación ante un posible escenario futuro.

Se observa un sostenido aumento tanto de los niveles máximos como de las velocidades máximas para todas las recurrencias. Variación que es mayor para eventos más frecuentes con menores recurrencias. Se visualiza además que los niveles máximos aumentan en mayor proporción que las velocidades máximas, debido al almacenamiento temporario del agua dentro de la cuenca por colmatación de la capacidad de evacuación del actual sistema de desagües pluviales.

Es menester recordar que, en el posible escenario futuro planteado, las superficies impermeables alcanzan los índices máximos de FOS especificados para cada zonificación, sin embargo el actual CEM no restringe las

superficies impermeables de los lotes, por lo que puede ser factible r un escenario de mayor impermeabilidad total.

Puede concluirse que los resultados obtenidos en términos de niveles y velocidades máximas y el correspondiente mapeo de esas variables hidráulicas constituyen una importante herramienta a la hora de la planificación integral de la problemática del escurrimiento pluvial urbano actual y futuro de la ciudad de Oberá.

En una futura etapa de los trabajos se prevé determinar tensiones de corte de fondo producidas por el flujo sobre las vías de escurrimiento principales, en vista a lograr en conjunto con la identificación de los tipos de suelos y su resistencia, la correspondiente zonificación de vulnerabilidad a erosión.

REFERENCIAS

- CELO, 2013. Cooperativa Eléctrica Limitada Oberá. Comunicación interna.
- Google Earth®, 2013. Imagen de 3 de mayo de 2010. 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.
- HAUSEN, J., 1919. Contribución al estudio de la petrografía del territorio nacional de Misiones. Ministerio de agricultura de la nación, Dirección general de minas, geología e hidrografía. Boletín N° 21, Serie B (geología). Buenos Aires. 39p.
- 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.
- SRTM, 2009. The Shuttle Radar Topography Mission, NASA.
- US-SCS (Soil Conservation Service), 1975. Urban Hydrology for Small Watersheds, Technical Release No. 55, SCS-USDA, Washington, D.C.