

INFRAESTRUCTURA VERDE COMO ALTERNATIVA SUSTENTABLE PARA REDUCIR EL RIESGO HÍDRICO EN AREAS URBANIZADAS

Erik Zimmermann⁽¹⁾, Laura Bracalenti⁽²⁾ y Adolfo Onocko⁽³⁾

⁽¹⁾Cátedra de Hidrología . Fac. Ciencias Exactas, Ingeniería y Agrimensura, UNR. Riobamba 245bis, Rosario, Argentina. CONICET Consejo Nacional de Investigaciones Científicas y Técnicas.

⁽²⁾CEAH (Centro de Estudios del Ambiente Humano). Facultad de Arquitectura, Planeamiento y Diseño. UNR. Riobamba 250bis, Rosario, Argentina. CIUNR (Consejo de Investigaciones de la Universidad Nacional de Rosario).

⁽³⁾Pasante CEAH (Centro de Estudios del Ambiente Humano). Facultad de Arquitectura, Planeamiento y Diseño. UNR. e_mail: erikz@fceia.unr.edu.ar

RESUMEN

En este trabajo se aborda la incidencia de los espacios verdes urbanos y periurbanos en la dinámica hídrica de tres subcuencas de la ciudad de Rosario, ubicadas al norte y noroeste del casco urbano sobre el valle de inundación del arroyo Ludueña. Se aplicó un método simple para estimar un indicador, basado en el coeficiente de escorrentía del método racional, que permitió cuantificar la magnitud del impacto de áreas verdes en el escurrimiento de cada subcuenca. El coeficiente de escorrentía (C), correspondiente a un área determinada, se estima en base al uso y el tipo de suelo existentes, pautado por una vasta bibliografía internacional. La clasificación de suelo se realizó a través de la interpretación de imágenes satelitales y de su constatación en campo, asociando las clases detectadas a los coeficientes de escorrentía definidos para distintos tipos de tejido y coberturas de suelos urbanos y rurales. Se propuso un método para relacionar cambios en el indicador, conforme a escenarios hipotéticos de uso del suelo, con modificaciones del riesgo de inundación, en términos de recurrencia de diseño. Esta relación permite detectar que aumentos adecuados de superficie con cobertura vegetal, reducen significativamente el riesgo de inundaciones en los sistemas urbanos. En los tres casos analizados, un escenario que respete las áreas no urbanizables y considere espacios verdes urbanos, permite evacuar excedentes pluviales futuros con la misma infraestructura existente albergando mayor población.

Palabras clave: uso de suelo, infraestructura verde, coeficiente de escorrentía, riesgo hídrico.

ABSTRACT

In this work the incidence of urban and peri-urban green spaces in the hydrodynamics for sub-basins of the city of Rosario is presented. A simple method for estimating an indicator, based on the runoff coefficient of the rational equation, which allowed quantify the magnitude of the impact of green areas in the runoff of each urban sub-basin, was applied. The runoff coefficient (C), corresponding to a given area is estimated by the use and kind of existing soil, following a wide bibliography. The soil classification was made using satellite images and field tasks, associating classes detected and runoff coefficients, defined for different types of coverage of urban and rural soils. A method is proposed to relate changes in the indicator, according to scenarios of land use, with modifications of flood risks. This relationship can detect that adequate increases of green surfaces, significantly reduce the risk of flooding in urban systems. In all three cases, a scenario that respects not developable areas and urban green spaces can evacuate future rainwater surpluses with the same existing infrastructure and to host major population.

Keywords: land use, green infrastructure, runoff coefficient, water risk.

INTRODUCCIÓN

Los espacios verdes cumplen un rol relevante en la dinámica hídrica de los territorios urbanizados dadas sus condiciones de permeabilidad. Entre sus efectos positivos deben mencionarse la captura del escurrimiento y el mejoramiento del funcionamiento de la infraestructura pluvial.

La escorrentía superficial constituye un componente del ciclo hidrológico que provoca alto impacto en las zonas urbanas (Orsolini et al., 2008). Para su evaluación se deben considerar las entradas por precipitación, los procesos de intercepción de la lluvia por parte del follaje y su infiltración en las áreas permeables. En función de cómo se den estos procesos, resultarán los volúmenes de agua almacenados en el suelo que permitirán, luego, la evapotranspiración y la recarga de acuíferos.

Los actuales procesos de urbanización producen una acelerada reducción de la superficie de suelo con cobertura vegetal y el consecuente aumento de los riesgos de anegamiento e inundación debido a la insuficiencia de la red pluvial existente. Ante el aumento de la pavimentación y de las lluvias intensas, el hidrograma de crecida en cuencas en proceso de urbanización se va modificando, presentando caudales pico más altos y tiempos de ascenso más cortos a medida que la impermeabilización del suelo aumenta. Las condiciones en base a las cuales se han diseñado los distintos elementos de la red de drenaje urbano (hidrograma de proyecto), se modifican significativamente debido a la impermeabilización del suelo, determinando un desajuste entre las demandas y la capacidad de respuesta del sistema.

Frente a las tendencias crecientes de los procesos de urbanización, esta problemática se tornará más compleja y difícil de resolver si no se toman medidas inmediatas que puedan desarrollarse paralelamente a los mencionados procesos de pavimentación y edificación.

Este estudio intenta profundizar el conocimiento de la incidencia de la impermeabilización del suelo sobre la dinámica hídrica urbana y de los servicios hidrológicos que prestan los espacios verdes en términos de disminución de riesgos de inundación y ahorro de costos sociales y económicos en las ciudades.

DEFINICIÓN DEL PROBLEMA

En el contexto del cambio climático, el incremento de los volúmenes de lluvia constituye un serio problema en áreas urbanizadas, sobre todo en aquéllas que cursan procesos de densificación y expansión. En esta situación se encuadra el municipio de Rosario, en donde se han producido inundaciones durante los últimos años.

Las consecuencias más notables del calentamiento global en la zona bioclimática de Rosario son el aumento de las temperaturas, la presencia de fuertes tormentas eléctricas y la modificación del régimen de lluvias, expresada esta última a través de la concentración de las precipitaciones y la variación de los volúmenes anuales (1000 mm promedio), registrándose incrementos de hasta un 65% (2012) y reducciones del 30% (2013). La inundación repentina ante lluvias intensas por sobrecarga de los sistemas de drenaje, constituye un problema recurrente con impactos negativos de gran importancia social y económica para Rosario. Cabe mencionar que, aún tras concretarse obras pluviales de envergadura, algunos barrios volvieron a inundarse debido a desbordes de los canales subsidiarios del arroyo Ludueña (Nuevo Alberdi, 2007) y otros, se anegaron por primera vez como consecuencia de la imposibilidad de la red de drenaje de desaguar ante crecidas del cuerpo receptor (Fisherton, 2012).

Durante las últimas dos décadas se ha intensificado el fenómeno de impermeabilización del suelo en la región, debido no sólo al avance de la frontera urbana dispersiva sobre los vasos de inundación de arroyos y canales, sino también de la frontera agraria intensiva en áreas rurales, ocasionando, a raíz de las lluvias intensas, inundaciones en distintas localidades del área metropolitana de Rosario. Ambos procesos continúan su progresión, incrementando los riesgos. La demanda de nueva infraestructura es constante y su construcción sumamente complicada, por lo que nunca se llegan a anular los riesgos reales en tiempo y forma. De hecho, la nueva y costosa infraestructura pluvial que está construyéndose, ya resulta insuficiente para resolver los problemas actuales.

En este contexto, las preguntas de partida que motivaron este estudio fueron las siguientes:

- *¿Cómo puede evaluarse la incidencia de la variación de superficies verdes intra y periurbanas en los volúmenes de escorrentías pluviales?*
- *¿Cuál es la relación entre la reducción de escorrentías y el riesgo de inundación y anegamiento en las ciudades?*
- *¿Incidirá significativamente la variación de superficies verdes en los volúmenes de escorrentías pluviales?*

OBJETIVOS DEL ESTUDIO

General

- Determinar los efectos del incremento de las áreas verdes sobre la escorrentía pluvial y el control de la urbanización en áreas urbanas y periurbanas, analizando diferentes escenarios de uso de suelo.

Particulares

- Cuantificar indicadores que describan los *actuales* impactos en la escorrentía en subcuencas seleccionadas como áreas de estudio.
- Cuantificar indicadores que describan los *posibles* impactos en la escorrentía en subcuencas seleccionadas como áreas de estudio, considerando tres escenarios propuestos.
- Cuantificar las posibles modificaciones en el riesgo de inundación para las subcuencas de estudio, considerando diferentes escenarios propuestos.

CARACTERÍSTICAS DEL ÁREA DE ESTUDIO

Las tres subcuencas analizadas forman parte de la cuenca del arroyo Ludueña. Se localizan al Noroeste del municipio de Rosario, sector afectado por los desbordes del arroyo y de sus afluentes, los canales Salvat e Ibarlucea.

La cuenca de aporte del Arroyo Ludueña abarca un área total de 700 km² sobre la que se asientan distintas localidades del área metropolitana de Rosario. De esta superficie, corresponden a la ciudad cabecera unos 105 km². El vaso de inundación del arroyo ha ido ocupándose, ya sea en forma irregular o legal a través de urbanizaciones de distinto tipo,

sin considerar el riesgo existente en el área. En el caso particular de Rosario, la mayor expansión de la ciudad tiene lugar, desde hace ya varias décadas, sobre el frente territorial Oeste, coincidente con el valle de inundación del arroyo. La lógica del proceso inmobiliario sobre el suelo no apto es conocida: Suelos con riesgo de inundación, de bajo valor inmobiliario por su ineptitud para la urbanización, y en su gran mayoría afectados a normativas regulatorias, son adquiridos y dotados de infraestructura básica para el desarrollo de barrios cerrados y abiertos bajo reglas de excepcionalidad. Estos procesos constituyen un extraordinario negocio para los inversores y un gran problema para los sectores consolidados circundantes y para la ciudad en su conjunto. En el caso de Rosario, si bien existen desde 1988 ordenanzas de regulación de suelos inundables, la urbanización siguió su curso sobre los mismos, haciendo caso omiso al riesgo existente. Cabe mencionar que tras la impactante inundación de 1986, se construyó una presa de retención de crecidas, hecho que desencadenó un incremento significativo de la urbanización en las áreas periurbanas de la ciudad localizadas en la cuenca baja, afectadas por los frecuentes desbordes del arroyo y sus afluentes. No obstante la construcción de la presa, se inundaron diversos sectores residenciales de Rosario durante 2007, 2009, 2012 y 2014, algunos de los cuales no habían sido antes alcanzados por el agua.

La reducción progresiva de áreas no urbanizables reguladas por normativa de inundación, así como la ocupación de las mismas -informal o formal a través de excepciones- se indica en la Tabla 1.

Tabla 1: Porcentajes de suelo ocupado por zonas reguladas en planicies de inundación del arroyo Ludueña en Rosario. (Zimmermann y Bracalenti, 2012)

	Superficie Libre escurrimiento	Superficie Impactos mayores	Superficie Impactos menores
Ord. 6288/1996 (2001)	235 Ha	1499 Ha	358 Ha
	Suelo ocupado 9%	Suelo ocupado 28 %	Suelo ocupado 40%
Ord. 8876/2011 (2011)	235 Ha	1244 Ha	454 Ha
	Suelo ocupado 41%	Suelo ocupado 49%	Suelo ocupado 49%

Además del avance de la urbanización, existen otras evidencias físicas que indican que el nivel de protección ante inundaciones ha descendido

respecto de lo que fuera previsto en los años 1986-88 como criterio de diseño para eventos de recurrencia de $R = 100$ años. La conjunción de factores tales como los procesos de urbanización mencionados, las canalizaciones para el drenaje de bajos naturales y las modificaciones en las prácticas de uso de las tierras rurales, están produciendo un paulatino aumento de los caudales máximos de escurrimiento superficial como así también del volumen de escurrimiento para lluvias de igual magnitud. En este sentido existen estudios que pusieron de manifiesto estos efectos (Zimmermann et al., 2001). Desde otra perspectiva, la consecuencia de dicho proceso puede verse como una disminución del nivel de protección ante inundaciones en diversos sectores de la cuenca hidrográfica, pero con mayor impacto en las zonas urbanas cuenca abajo, donde las permanencias de las inundaciones son de mayor tiempo que en sectores de la cuenca media y alta. Una de las mayores evidencias indicadoras de este sistemático incremento de caudales, es el progresivo aumento de la capacidad necesaria de descarga del arroyo Ludueña en el río Paraná que debió y deberá llevarse a cabo para mitigar inundaciones:

- en la década de los años cuarenta se necesitaron 23 m^2 de sección transversal de conducciones cerradas para entubar, en aproximadamente 1400 m, el caudal de diseño del arroyo (caudal aproximado de diseño $100 \text{ m}^3/\text{s}$).
- en la década de los años sesenta se debió incrementar a 36 m^2 la capacidad de las conducciones debido a inundaciones con fuerte impacto en el barrio de Empalme Graneros (caudal aproximado de diseño $150 \text{ m}^3/\text{s}$).
- a partir de las inundaciones de 1986 con severos impactos en barrios del oeste de la ciudad, se proyectó elevar a 73 m^2 la capacidad de las conducciones cerradas con el agregado de una presa de retención para laminar el caudal máximo proveniente de casi un 60 % del área de la cuenca (caudal aproximado de diseño $300 \text{ m}^3/\text{s}$).
- en el año 2007 habiendo sido construidas todas las obras proyectadas, se llegó a una situación límite no esperada donde el desborde del arroyo en barrio Empalme estuvo a punto de concretarse. Tras posteriores estudios se concluyó que para restaurar la seguridad hídrica es necesario dotar de una sección total de descarga de 174 m^2 (un caudal de unos $500 \text{ m}^3/\text{s}$ para los conductos de descarga).

Subcuencas analizadas en la ciudad de Rosario

El estudio se ha realizado en tres de las dieciocho subcuencas de la ciudad.

Para la selección de las mismas se tuvo en cuenta la conveniencia de analizar situaciones urbanas y periurbanas diversas, es decir, áreas no urbanizadas, áreas parcialmente urbanizadas y áreas altamente urbanizadas.

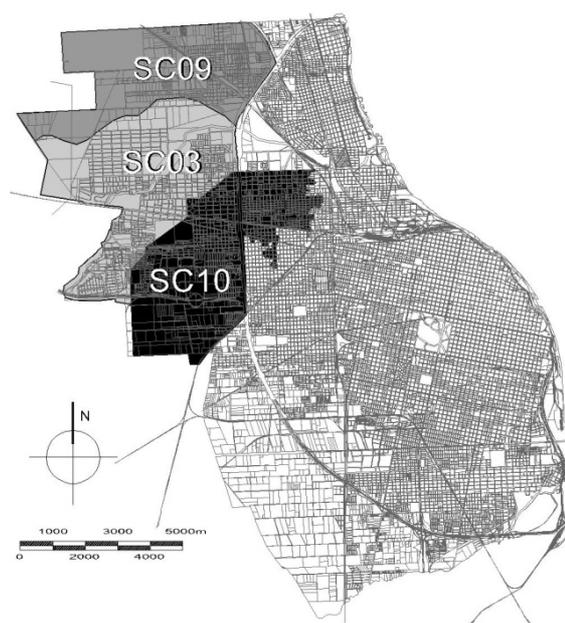


Figura 1. Subcuencas urbanas analizadas de la ciudad de Rosario.

La **Subcuenca 09 (SC9)** está ubicada al Noroeste del territorio Municipal. Pertenece casi en su totalidad al Distrito Norte y ocupa un área de 1641ha. Presenta gran diversidad de usos de suelo y contiene una de las zonas no urbanizables de mayor superficie que aún se mantienen en el municipio, la cual representa alrededor del 40% del total de la subcuenca. Incluye sectores residenciales correspondientes a grupos medios, medios-bajos y bajos. Existen numerosos barrios construidos por el estado, otros están actualmente en construcción y si bien una gran parte de su superficie urbanizable no está todavía edificada, están planificados diversos proyectos de vivienda social que prevén tipologías residenciales colectivas y con uso privado del suelo. En el caso de éstas últimas, de acuerdo a las tendencias evidenciadas en la ciudad, la superficie verde prevista va edificándose progresivamente, por lo cual, a mediano plazo, presentan un alto grado de impermeabilización del suelo a pesar de mantener una baja densidad poblacional. El estudio de la SC9

reviste especial interés debido a que están urbanizándose áreas inundables y sectores rurales que debieran preservarse para mantener la infraestructura verde urbana.

La **Subcuenca 03** (SC3) se localiza en el centro-Oeste de la ciudad y su borde Oeste coincide con parte del límite jurisdiccional del municipio, sobre el frente rural. Esta subcuenca es extensa, abarcando una superficie de 1952 hectáreas, cerca del 45% de la superficie del Distrito Municipal Noroeste, al que pertenece. Presenta sectores altamente urbanizados, barrios periurbanos de baja densidad, zonas industriales y rurales. La diversidad de usos de suelo determina una densidad media de población baja. Esta subcuenca resulta de interés por la intensiva urbanización del suelo inundable mediante las modalidades de barrios abiertos y cerrados con tipologías residenciales de baja densidad, y porque se han producido inundaciones recientes en sectores urbanizados. Estas inundaciones fueron ocasionadas por la imposibilidad de evacuación de la infraestructura pluvial en el arroyo Ludueña debido a sus crecidas súbitas, influidas por las intensas lluvias y la impactante urbanización de su vaso de inundación.

La **Subcuenca 10** (SC10), se ubica en el centro-Oeste de la ciudad, al Sureste de la SC03. Tiene una superficie de 1905 ha y, a excepción del sector Sur, correspondiente al Distrito Oeste, pertenece en su totalidad al Distrito Noroeste. Integra áreas urbanizadas de diverso valor inmobiliario, periurbanas y rurales. Presenta sectores forestados, hortícolas tradicionales y agrarios intensivos, además de grandes superficies vacantes. Reviste interés para la investigación ya que en ella se localizan zonas densamente urbanizadas que se han inundado recientemente que nunca antes habían sido alcanzadas por el agua y porque contiene una superficie rural significativa que constituye un componente relevante de la infraestructura verde de la ciudad. El sector Noroeste de la SC10 está siendo rápidamente ocupado por tejido residencial de baja densidad tras diversas operaciones inmobiliarias que otorgaron alto valor al suelo de este sector del vaso de inundación. Otro aspecto que debe mencionarse es que acaba de habilitarse un parque industrial de gran superficie en un área actualmente no urbanizada y con coberturas vegetales. Estos sectores debieran planificarse considerando preservar superficies permeables suficientes para evitar el agravamiento de los conflictos.

METODOLOGÍA

Una metodología sencilla, que se puede utilizar para estimar el impacto de AFUP (agricultura y forestación urbana y periurbana) en la escorrentía urbana, consiste en la aplicación de la, actualmente utilizada, fórmula racional.

El método racional fue desarrollado por Mulvaney (1850) cuya propuesta se basa en que: dada una cuenca de área A con un tiempo de concentración T_c , si se produce una lluvia P con duración $D=T_c$, el caudal generado en el punto de salida será el máximo, ya que estará aportando toda la cuenca. El método plantea una proporcionalidad entre el caudal máximo y la intensidad de lluvia y puede expresarse como:

$$Q = C_u \cdot C \cdot i \cdot A \quad (1)$$

donde: Q es el caudal de diseño (L^3/T), C_u es el coeficiente de conversión de unidades, C es el coeficiente de escurrimiento (adimensional), i es la intensidad de la precipitación de diseño (L/T), y A es el área de drenaje de cuencas (L^2).

El coeficiente de escurrimiento C , es la variable que presenta mayor incertidumbre en su determinación, y representa una relación adimensional entre la lámina de escorrentía superficial generada por una determinada cuenca y la lámina de la precipitación. El coeficiente de escorrentía varía con la pendiente, condiciones de la superficie y de la cubierta vegetal y el tipo de suelo hidrológico. Las superficies que son relativamente impermeables como las calles y plazas de aparcamiento tienen coeficientes de escorrentía que se aproximan a uno. Las superficies con vegetación para interceptar la escorrentía superficial y las que permiten la infiltración de las precipitaciones tienen coeficientes de escorrentía más bajos (cerca de 0). Todos los demás factores son iguales, una zona con una mayor pendiente tendrá más escorrentía de aguas pluviales y así un coeficiente de escorrentía más alto que una zona con una pendiente inferior. Los suelos que tienen un alto contenido de arcilla no permiten mucha infiltración y por lo tanto tienen coeficientes relativamente altos de escurrimiento, mientras que los suelos con alto contenido de arena tienen mayores tasas de infiltración y bajos coeficientes de escorrentía.

Este coeficiente se puede cuantificar en términos de tipo de suelo, pendiente topográfica y tipo de cobertura. Numerosa bibliografía puede consultarse

para estimar los coeficientes de escurrimiento (Chow et al., 1988; McCuen, 1998). En el caso de que haya heterogeneidades en dichos parámetros, debe ser estimado mediante áreas de ponderación un valor representativo del coeficiente de escurrimiento. En este caso un C compuesto se puede definir como:

$$C_c = \frac{\sum C_i A_i}{\sum A_i} \quad (2)$$

donde C_c es el coeficiente de escurrimiento compuesto, C_i son los coeficientes de escurrimiento de áreas homogéneas y A_i son áreas individuales con C homogéneo. Esta información se puede estimar mediante imágenes satelitales, cartografía de suelos y modelos digitales del terreno.

La intensidad media máxima, i , se determina a partir de curvas Intensidad-Duración-Recurrencia (IDR) construidas con datos medidos en el sitio en estudio. Con dichas curvas se adopta una duración de diseño igual al tiempo de concentración de la cuenca y para una recurrencia especificada se obtiene la intensidad media máxima.

El tiempo de concentración de una cuenca, t_c , se define como el tiempo que demora el sector más alejado de la cuenca en aportar a la sección de salida. El tiempo de concentración se calcula como la suma de los tiempos de escurrimiento mantiforme (no encauzado) y el tiempo de flujo canalizado (encauzado). Pueden existir varios recorridos posibles de flujo para las diferentes áreas drenadas, el mayor tiempo de concentración de todos los tiempos, para los diferentes recorridos, es el tiempo de concentración crítico a adoptar para el área drenada.

Indicador para la evaluación de impactos

Teniendo en cuenta la descripción anterior, un indicador que permita evaluar el impacto de las zonas verdes en una urbanización determinada sería la variación del coeficiente de escurrimiento. En consecuencia, la ecuación racional podría ser una herramienta útil para evaluar los diferentes escenarios, por ejemplo, la comparación de antes y después de cambios de usos de suelo. Podemos comparar situaciones con y sin infraestructura verde (AFUP), evaluando el impacto relativo entre ellos.

Los datos recogidos podrían ser utilizados para calcular la reducción en la escurrimiento debido a una

mayor ocupación de áreas AFUP en las cuencas urbanas. Se propone medir la "reducción en el coeficiente de escurrimiento (ΔC) para el seguimiento de los impactos a nivel urbano (Zimmermann y Bracalenti, 2012). Valores ΔC negativos para cualquier período de tiempo indican una disminución neta de la escurrimiento (y consecuente reducción de riesgo de inundación), provocado por un aumento en la infiltración/ almacenamiento de la precipitación en esa superficie urbana. El indicador ΔC , en términos porcentuales, se puede calcular de la siguiente manera:

$$\Delta C = 200 \frac{C_{t+1} - C_t}{C_{t+1} + C_t} \quad (3)$$

donde C_{t+1} es el coeficiente de escurrimiento para escenarios futuros (hipotéticos) y C_t = el coeficiente para un escenario actual.

Relación entre la reducción de c y la reducción del riesgo de inundación

Utilizando la ecuación racional, el caudal de diseño para un espacio sin AFUP, en el tiempo t (escenario actual, por ejemplo) puede cuantificarse como:

$$Q_t = C_u \cdot C_t \cdot i_t \cdot A \quad (4)$$

donde Q_t es el caudal de diseño, C_t es el coeficiente de escurrimiento e i_t es la intensidad de la lluvia de diseño, todas las variables en el tiempo t . El resto de variables se definió antes. La intensidad i_t tiene una duración equivalente al T_c de la cuenca, en el tiempo t .

Incluyendo áreas verdes (escenario hipotético, por ejemplo), en el tiempo $t+1$, el caudal de diseño será:

$$Q_{t+1} = C_u \cdot C_{t+1} \cdot i_{t+1} \cdot A \quad (5)$$

En este caso, la intensidad de lluvia tiene una duración equivalente al T_c de la cuenca en el tiempo $t+1$. Incluyendo las zonas verdes, el T_c será mayor que el mismo en situación sin AFUP. Despreciando esta situación, el caudal de diseño en la situación con AFUP será menor que el que corresponde al momento t , debido a que el coeficiente de escurrimiento C_{t+1} será menor que C_t . En la situación en el tiempo t , la intensidad de lluvia, se corresponde con un nivel de protección determinado (período de retorno T_t). De acuerdo con Kieffer y Chu (1988),

citados por Chow et al. (1988), en el marco de un modelo empírico que ajusta una curva IDR, la intensidad de lluvia puede expresarse como:

$$i = \frac{g \cdot T^m}{d^e + f} \quad (6)$$

donde T es el período de retorno, d es la duración y g, m, e y f son constantes que dependen de las características geográficas locales.

Podría pensarse la situación siguiente: Con la infraestructura de drenaje actual, supuestamente diseñada para el caudal Q_t ¿En qué magnitud se reduce el riesgo de inundaciones urbanas (se reduce en probabilidad de excedencia P o aumenta el período de retorno T) ante el aumento de áreas verdes y la consecuente disminución del coeficiente de escorrentía C_{t+1} ?

En virtud de las consideraciones anteriores, puede decirse que:

$$Q_t = Cu \cdot C_{t+1} \cdot i'_{t+1} \cdot A \quad (7)$$

donde i'_{t+1} es la intensidad de la lluvia, asociada a un período de retorno T_{t+1} que en la nueva situación t+1 genera la descarga Q_t .

Igualando las ecuaciones (5) y (7) y teniendo en cuenta la ecuación (6), se tiene:

$$Q_t = Cu \cdot C_{t+1} \cdot \frac{g T_{t+1}^m}{d^e + f} \cdot A = Cu \cdot C_t \cdot \frac{g T_t^m}{d^e + f} \cdot A \quad (8)$$

Simplificando términos de la igualdad, se obtiene (Zimmermann y Bracalenti, 2014):

$$\left(\frac{C_{t+1}}{C_t} \right)^{1/m} = \frac{T_t}{T_{t+1}} = \frac{P_{t+1}}{P_t} \quad (9)$$

donde P_t y P_{t+1} son las probabilidades de excedencia de la intensidad de lluvia en las situaciones t y t+1, respectivamente. Si se grafica la ecuación (9), resulta (Figura 2):

Mediante pasos algebraicos se puede demostrar que:

$$\frac{C_{t+1}}{C_t} = \frac{200 + \Delta C}{200 - \Delta C} \quad (10)$$

Por ejemplo, el ajuste de la ecuación (9) para los datos de lluvia de la ciudad de Rosario (Argentina, 32 ° 57 'S, 60 ° 41' W), es $m = 0.122$. El promedio regional del parámetro m es 0.18 (Zimmermann, 2013). Utilizando la Figura 2, una pequeña reducción del coeficiente de escorrentía del 5 % provocaría una reducción de probabilidad de inundación de 30 % ($P_{t+1}/P_t = 0.70$). Ampliando el ejemplo, puede interpretarse que: dados en el diseño urbano de drenaje, una probabilidad de excedencia del 20 % (tiempo de retorno de 5 años), con una reducción del coeficiente de escorrentía del 5%, el nivel de protección alcanzaría el valor $0.70 * 20 \% = 14 \%$ de probabilidad de excedencia (nuevo tiempo de retorno aproximado 7 años).

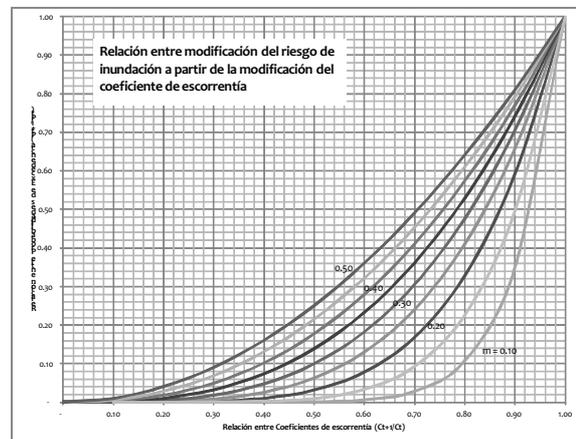


Figura 2. Relación entre modificación del riesgo de inundación a partir de la modificación del coeficiente de escorrentía.

Escenarios

En la aplicación de la metodología a las cuencas descritas anteriormente se analizaron cuatro escenarios: 1) urbanización actual; 2) urbanizadas las áreas urbanizables de acuerdo a planes y normativa vigentes; 3) urbanizadas las áreas actualmente no urbanizables y 4) urbanizadas las áreas urbanizables de acuerdo a planes y normativa vigentes mediante tipologías residenciales de alta densidad poblacional y alta permeabilidad de suelo (Di Bernardo, 2013), e incrementadas y optimizadas las áreas verdes.

Se comparó el escenario actual con los escenarios hipotéticos que simulan porcentajes mayores de suelo con coberturas impermeables (construidas) y permeables (verdes), respectivamente.

RESULTADOS

A continuación se presentan los escenarios y usos del suelo correspondientes a los mismos, junto con los resultados de aplicar la metodología propuesta para cada una de las subcuencas analizadas (Referencias en Figura 3).

Subcuenca Emisario 09

En el drenaje urbano, es frecuente diseñar los sistemas con una probabilidad de excedencia del 20 %, esto es tiempo de retorno de 5 años, el cual se tomará como referencia para analizar las situaciones futuras de uso del suelo propuestas. En la Figura 4 se muestran los usos del suelo para el escenario actual y los futuros propuestos. En la actualidad (escenario 0), el C es 0.40 el cual se toma como línea base (Tabla 2). El C correspondiente al escenario que representa la urbanización de las áreas urbanizables (escenario 1), es 0.47, lo que implica un aumento de aproximadamente 16 % de su valor actual. Considerando un valor de $m = 0.122$ ajustado para las precipitaciones de Rosario, aplicando la ecuación 9, indica que bajo las condiciones del escenario 1, el riesgo de ser superada la precipitación de diseño aumenta 3.75 veces. Esto implica una nueva probabilidad de excedencia que alcanza el valor del 75% (tiempo de retorno de 1.3 años).

Para el escenario con mayor superficie de suelo impermeabilizado (escenario 2), el coeficiente de escorrentía alcanza un valor de 0.63, lo que implica un 44.7 % de aumento en comparación con el actual. La nueva probabilidad de excedencia alcanza un valor superior al 100% (828%). Esto significa que el sistema de drenaje sería excedido en su capacidad en forma permanente. Estos valores evidencian una situación indeseable que demandaría una ampliación de la infraestructura de drenaje pluvial urbano para retornar a las condiciones de seguridad actuales.

Para el escenario 3, en el que se incrementa la urbanización a través de tipologías edilicias ambientalmente eficientes y se optimizan las coberturas de suelo de las áreas verdes actuales mediante usos AFUP, el coeficiente de escorrentía alcanza un valor de 0.39, lo que involucra una

disminución del 2.5% respecto del actual. La nueva probabilidad de excedencia alcanza un valor del 16%. Es decir, se reduce el riesgo de inundación con el sistema de drenaje actual. Estos valores permiten señalar que se mejoraría significativamente la situación, aún incrementando las áreas urbanizadas y la densidad de población (Piacentini et al., 2015).

Subcuenca Emisario 03

En la Figura 5 se muestran los usos del suelo para el escenario actual y los futuros propuestos para la subcuenca 03. La Tabla 3 muestra la diferencia entre los coeficientes de escorrentía de los escenarios propuestos. Con el uso actual de la tierra (escenario 0), el coeficiente de escorrentía media es de 0.49 para toda la zona de estudio. Para el Escenario 1, el coeficiente de escurrimiento alcanza un valor de 0.53, lo que implica un aumento de alrededor del 8% de su valor actual. Teniendo en cuenta el valor de $m = 0.122$ ajustado para Rosario, aplicando la ecuación (9) para un aumento del coeficiente de escorrentía del 8% causaría un incremento del riesgo de inundación equivalente a 1.90 veces. Dada una probabilidad de excedencia de 20% para la situación actual, la nueva probabilidad de excedencia alcanzaría el valor de $1.9 * 20\% \approx 38\%$ (un nuevo período de retorno de 2.6 años). Para el escenario 2 (impermeabilización extrema), el coeficiente de escurrimiento alcanza un valor de 0.58, lo que representa aproximadamente un aumento del 18% respecto a su valor actual. Aplicando la ecuación (9) se llegaría a una relación equivalente entre probabilidades de excedencias de aproximadamente 4. Dada una probabilidad de excedencia de 20%, la nueva probabilidad de excedencia alcanza el valor de 80% y un tiempo de retorno de aproximadamente 1.25 años. Esta situación hará necesaria una fuerte reinversión en infraestructura de drenaje urbano sólo para mantener el estado de la protección en las condiciones actuales. Para el escenario 3 con el aumento de espacios AFUP el coeficiente de escurrimiento mantiene el valor actual de 0.49. A pesar de que las condiciones de seguridad serían las mismas, la situación representa un escenario futuro con mayor población y urbanización más eficiente, lo que implica una mejora significativa. (Zimmermann et al., 2016).

REFERENCIAS

- | | |
|---|--|
|  Calles (aceras y calzadas) (*) |  Suelo desnudo compactado |
|  Pavimentos en espacios públicos |  Cultivo extensivo |
|  Vivienda unifamiliar, hasta 2 pisos (< OCUPACION DE SUELO) |  Cultivo hortícola tradicional |
|  Vivienda unifamiliar, hasta 2 pisos (> OCUPACION DE SUELO) |  Cultivo hortícola agroecológica |
|  Vivienda unifamiliar con centro de manzana forestado |  Forestal : bosques denso |
|  Viviendas multi - unidades, hasta 4 pisos |  Forestal : (más del 50% del terreno cubierto) |
|  Viviendas multi - unidades, más de 4 pisos |  Forestal : (menos del 50% del terreno cubierto) |
|  Viviendas multi unidades con acera, centro de Mz. y terraza verde |  Escasa vegetación (no compactado por la actividad humana) |
|  Residencial suburbano |  Ladrilleras |
|  Barrio cerrado |  Ladrilleras con construcciones dispersas |
|  Area comercial y de negocios |  Basurales |
|  Asentamientos irregulares incipientes |  Cursos de agua, Cavas |
|  Asentamientos irregulares consolidados |  Equipamiento deportivo sobre terreno forestado |
|  Industrial poco densa |  Equipamiento urbano (> permeabilidad) (**) |
|  Industrial densa |  Equipamiento urbano (< permeabilidad) (**) |
|  Pasto/prado/césped suelo arcillo-limoso | |

NOTA:
 (*) INCLUYE DISTINTO TIPO DE ACERAS Y CALZADAS PAVIMENTADAS Y DE TIERRA. LAS SUPERFICIES RESPECTIVAS SE SUMARÁN A LAS CLASES CORRESPONDIENTES PARA LA OBTENCIÓN DE LOS RESULTADOS FINALES.
 (**) EN CASO DE NO ESTAR PLANIFICADO EL CARACTER ESPECIFICO DE LA OCUPACION, SE DECIDIRÁ UNA ALTERNATIVA POSIBLE DE ACUERDO AL CONTEXTO.

Figura 3. Referencias para los usos de suelo en las figuras.

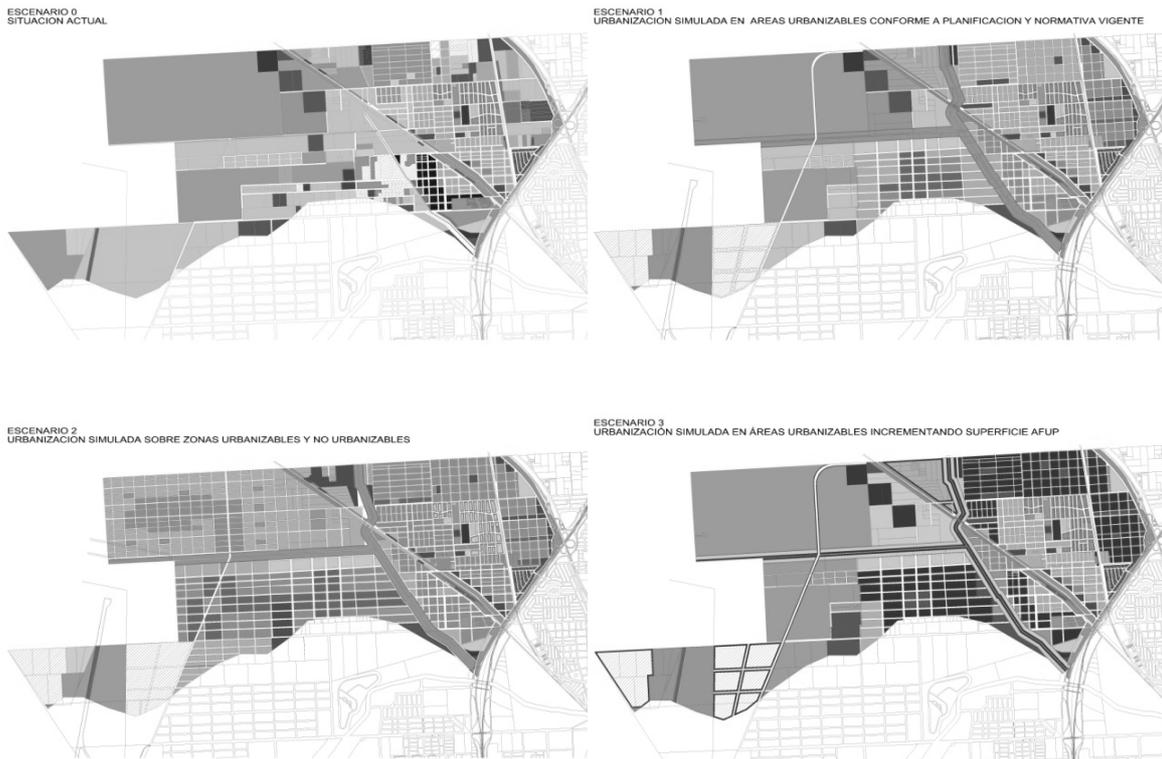


Figura 4. Escenarios de uso del suelo propuestos para la subcuenca 09.

Tabla 2: Porcentajes de coberturas y coeficientes de escurrimientos medios por escenarios subcuenca 09.

	C	Escen 0 % Sup	Escen 1 % Sup	Escen 2 % Sup	Escen 3 % Sup
Pavimentos en espacios públicos	0.90	3.4	6.8	17.1	4.7
Vivienda unifamiliar, hasta 2 pisos (< OCUPACION DE SUELO)	0.60	4.7	13.5	17.2	4.1
Vivienda unifamiliar, hasta 2 pisos (> OCUPACION DE SUELO)	0.65	0.2	6.1	24.8	0.9
Vivienda unifamiliar con centro de manzana forestado	0.57	0.2	0.0	-	-
Viviendas multi - unidades, hasta 4 pisos	0.70	1.0	3.2	6.8	0.9
Viviendas multi - unidades, mas de 4 pisos	0.75	-	-	-	-
Viviendas multi unidades con acera, centro de Mz. y terraza verde	0.48	-	-	-	15.1
Residencial o suburbano	0.40	0.8	0.2	-	0.2
Barrio cerrado	0.48	-	-	-	-
Area comercial y de negocios	0.60	-	-	-	-
Asentamientos irregulares incipiente	0.56	1.0	-	-	-
Asentamientos irregulares consolidados	0.70	1.2	-	-	-
Industrial poco densa	0.70	0.5	3.1	2.0	2.7
Industrial densa	0.80	0.4	1.0	3.0	1.0
Pasto/prado/césped suelo arcillo-limoso	0.30	11.3	18.3	11.3	13.5
Suelo desnudo compactado	0.63	7.0	2.5	3.0	1.4
Cultivo extensivo	0.21	30.2	22.5	3.4	25.8
Cultivo hortícola tradicional	0.20	-	-	-	-
Cultivo hortícola agroecológico	0.19	0.0	0.0	0.0	7.3
Forestal : bosques denso	0.13	-	-	-	-
Forestal : (más del 50% del terreno cubierto)	0.23	1.4	1.4	0.3	7.2
Forestal : (menos del 50% del terreno cubierto)	0.33	6.5	5.3	1.7	7.0
Escasa vegetación (no compactado por la actividad humana)	0.44	25.1	6.8	0.2	0.1
Ladrilleras	0.63	0.4	-	-	-
Ladrilleras con construcciones dispersas	0.74	2.2	-	-	-
Basurales	0.63	1.6	-	-	-
Cursos de agua, Cavas	1.00	0.4	0.4	0.4	0.4
Equipamiento deportivo sobre terreno forestado	0.30	0.6	2.0	1.9	2.0
Equipamiento urbano (> permeabilidad)	0.55	-	2.2	2.2	1.8
Equipamiento urbano (< permeabilidad)	0.60	-	4.6	4.6	3.8
C medio		0.40	0.47	0.63	0.39

SUB CUENCA EMISARIO 03 - CIUDAD DE ROSARIO
ESCENARIO 0 - SITUACION ACTUAL



SUB CUENCA EMISARIO 03 - CIUDAD DE ROSARIO
ESCENARIO 1 - URBANIZACION SIMULADA EN BASE A PLANIFICACION Y NORMATIVA VIGENTE



Figura 5. Escenarios de uso del suelo propuestos para la subcuenca 03. Continúa.

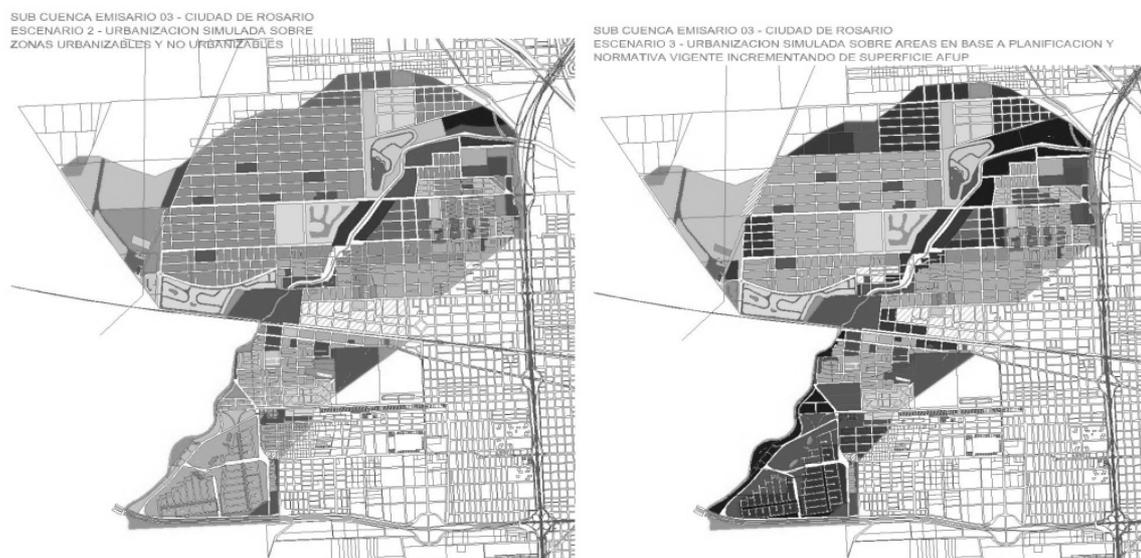


Figura 5. Continuación.

Tabla 3: Porcentajes de coberturas y coeficientes de escurrimientos medios por escenarios subcuenca 03.

	C	Escen 0 % Sup	Escen 1 % Sup	Escen 2 % Sup	Escen 3 % Sup
Pavimentos en espacios públicos	0.90	5.9	6.2	13.2	4.0
Vivienda unifamiliar, hasta 2 pisos (< OCUPACION DE SUELO)	0.60	4.9	25.5	13.4	19.4
Vivienda unifamiliar, hasta 2 pisos (> OCUPACION DE SUELO)	0.65	0.1	0.9	19.4	0.8
Vivienda unifamiliar con centro de manzana forestado	0.57	17.0	3.8	2.9	2.7
Viviendas multi - unidades, hasta 4 pisos	0.70	0.4	2.3	3.8	0.9
Viviendas multi - unidades, mas de 4 pisos	0.75	0.0	0.0	0.0	0.0
Viviendas multi unidades con acera, centro de Mz. y terraza verde	0.48	-	-	-	8.8
Residencial o suburbano	0.40	1.9	0.5	0.3	0.4
Barrio cerrado	0.48	6.8	9.2	6.2	6.2
Area comercial y de negocios	0.60	-	0.2	0.2	0.2
Asentamientos irregulares incipiente	0.56	0.1	-	-	-
Asentamientos irregulares consolidados	0.70	0.9	-	-	-
Industrial poco densa	0.70	0.6	1.2	1.2	1.2
Industrial densa	0.80	0.8	1.3	1.8	1.3
Pasto/prado/césped suelo arcillo-limoso	0.30	19.7	7.9	8.4	4.9
Suelo desnudo compactado	0.63	12.1	13.4	6.7	12.9
Cultivo extensivo	0.21	-	-	-	-
Cultivo hortícola tradicional	0.20	0.3	-	-	0.3
Cultivo hortícola agroecológico	0.19	0.0	0.0	0.0	0.0
Forestal : bosques denso	0.13	0.8	0.8	0.8	5.7
Forestal : (más del 50% del terreno cubierto)	0.23	1.3	2.4	2.4	6.7
Forestal : (menos del 50% del terreno cubierto)	0.33	13.4	13.6	10.2	14.5
Escasa vegetación (no compactado por la actividad humana)	0.44	10.8	8.0	5.9	6.0
Ladrilleras	0.63	0.0	-	-	-
Ladrilleras con construcciones dispersas	0.74	0.4	-	-	-
Basurales	0.63	-	-	-	-
Cursos de agua, Cavas	1.00	1.6	1.6	1.6	1.6
Equipamiento deportivo sobre terreno forestado	0.30	0.2	1.0	1.5	1.0
Equipamiento urbano (> permeabilidad)	0.55	-	0.1	-	0.4
Equipamiento urbano (< permeabilidad)	0.60	-	-	0.1	0.1
C medio		0.49	0.53	0.58	0.49

Subcuenca Emisario 10

En la Figura 6 se muestran los usos del suelo para el escenario actual y los futuros propuestos para la subcuenca 10. La Tabla 4 muestra la diferencia entre los coeficientes de escorrentía de los escenarios propuestos. Con el uso del suelo actual (escenario 0) el coeficiente de escorrentía promedio es 0.51 en esta subcuenca.

Considerando un uso futuro de la tierra con una impermeabilización acorde a la normativa vigente de uso del suelo (escenario 1), el coeficiente de escorrentía alcanza un valor de 0.53, lo que implica un aumento de aproximadamente 4 % de su valor actual. El escenario 1 indica un incremento poco significativo del coeficiente de escorrentía dado que la superficie urbanizable no representa un porcentaje relevante del área total y porque se mantienen como no urbanizables las áreas rurales.



Figura 6. Escenarios de uso del suelo propuestos para la subcuenca 10.

Tabla 4: Porcentajes de coberturas y coeficientes de escurrimientos medios por escenarios subcuenca 10.

	C	Escen 0 % Sup	Escen 1 % Sup	Escen 2 % Sup	Escen 3 % Sup
Pavimentos en espacios públicos	0.90	16.9	17.2	17.8	17.3
Vivienda unifamiliar, hasta 2 pisos (< OCUPACION DE SUELO)	0.60	9.1	12.8	16.2	9.4
Vivienda unifamiliar, hasta 2 pisos (> OCUPACION DE SUELO)	0.65	6.9	7.0	13.9	7.0
Vivienda unifamiliar con centro de manzana forestado	0.57	5.6	6.8	6.9	5.5
Viviendas multi - unidades, hasta 4 pisos	0.70	0.0	0.0	1.0	3.6
Viviendas multi - unidades, mas de 4 pisos	0.75	0.0	0.0	0.0	0.0
Viviendas multi unidades con acera, centro de Mz. y terraza verde	0.48	1.3	1.3	1.3	5.9
Residencial o suburbano	0.40	1.5	0.6	-	0.7
Barrio cerrado	0.48	0.6	0.6	0.6	0.6
Area comercial y de negocios	0.60	-	-	-	-
Asentamientos irregulares incipiente	0.56	0.5	-	-	-
Asentamientos irregulares consolidados	0.70	1.2	1.1	1.1	1.1
Industrial poco densa	0.70	1.5	2.4	3.6	4.6
Industrial densa	0.80	3.7	5.8	7.3	3.3
Pasto/prado/césped suelo arcillo-limoso	0.30	21.1	18.7	23.1	19.1
Suelo desnudo compactado	0.63	4.2	4.2	5.8	4.1
Cultivo extensivo	0.21	13.1	9.7	-	7.3
Cultivo hortícola tradicional	0.20	1.3	1.3	-	0.6
Cultivo hortícola agroecológico	0.19	-	1.9	0.3	5.5
Forestal : bosques denso	0.13	-	-	-	3.1
Forestal : (más del 50% del terreno cubierto)	0.23	0.1	0.6	0.1	2.6
Forestal : (menos del 50% del terreno cubierto)	0.33	3.0	2.7	1.6	3.9
Escasa vegetación (no compactado por la actividad humana)	0.44	8.1	4.5	-	-
Ladrilleras	0.63	1.0	1.0	-	-
Ladrilleras con construcciones dispersas	0.74	-	-	-	-
Basurales	0.63	0.1	0.1	-	-
Cursos de agua, Cavas	1.00	-	0.2	0.2	0.2
Equipamiento deportivo sobre terreno forestado	0.30	0.3	0.5	0.4	0.3
Equipamiento urbano (> permeabilidad)	0.55	-	-	-	-
Equipamiento urbano (< permeabilidad)	0.60	-	-	-	-
C medio		0.51	0.53	0.62	0.49

Considerando el valor de $m = 0.122$ ajustado para Rosario, aplicando la ecuación (9) se calcula que un aumento del coeficiente de escorrentía del 4 % ($C_{t+1}/C_t = 1.039$) provocaría un aumento de riesgo equivalente a $P_{t+1}/P_t = 1.37$ veces. Con el mismo ejemplo, en el diseño urbano de drenaje, dada una probabilidad de excedencia del 20 % (tiempo de retorno de 5 años), con un aumento del coeficiente de escorrentía del 4%, la nueva probabilidad de excedencia alcanzaría el valor del $1.37 * 20 \% = 27 \%$ (nuevo tiempo de retorno aproximado 3.6 años). Estos valores indicarían que la situación sería indeseable ya que implicaría una ampliación de la infraestructura de drenaje pluvial urbano para retornar a las condiciones de seguridad actuales.

Para el uso de suelo hipotético correspondiente al escenario 2 -significativo aumento de la impermeabilización- el coeficiente de escorrentía

alcanzaría un valor de 0.62, lo que supone aproximadamente un 20 % de aumento en comparación con su valor actual. Aplicando la ecuación (9) bajo los supuestos ya aclarados anteriormente, se obtiene que para $C_{t+1}/C_t = 1.22$ provocaría una relación equivalente a $P_{t+1}/P_t = 4.96$. Dada una probabilidad de excedencia del 20 %, para el cambio de uso de suelo la nueva probabilidad de excedencia alcanzaría el valor de 99% y el nuevo tiempo de retorno sería de 1 año aproximadamente. Estos valores indican que la situación se tornaría totalmente inadecuada y que sería indispensable una gran reinversión en la infraestructura de drenaje urbano para restablecer la situación de protección existente en las condiciones actuales.

El Escenario 3 plantea un uso de suelo que reduce el coeficiente de escorrentía actual a través del

incremento de áreas verdes y de la consideración de tipologías habitacionales de alta densidad habitacional y baja pavimentación de suelo. De este modo se lograría localizar una gran cantidad de población sin urbanizar el área rural. Para un uso hipotético de la tierra que optimice las coberturas vegetales de las áreas verdes existentes (escenario 3), el coeficiente de escorrentía alcanzaría un valor de 0.49, lo que supone un 4 % de disminución aproximada en comparación con su valor actual. Aplicando la ecuación (9) se tiene que para $C_{t+1}/C_t = 0.96$ la relación $P_{t+1}/P_t = 0.72$. Dada una probabilidad de excedencia del 20 %, para el cambio de uso de suelo, la nueva probabilidad de excedencia alcanzaría el valor de 14% y el nuevo tiempo de retorno sería de 6.9 años. Estos valores permiten señalar que se reducirían significativamente los riesgos sin necesidad de inversiones, por lo cual mejoraría la situación de la población (Zimmermann y Bracalenti, 2015).

CONCLUSIONES

De acuerdo con los resultados del estudio, puede afirmarse que evitar la urbanización del suelo inundable y preservar las áreas con cobertura vegetal, reduce significativamente el nivel de riesgo y las inversiones destinadas a la adecuación de la infraestructura pluvial.

Debido a los serios conflictos causados por la ocupación de áreas inundables, los nuevos enfoques urbanísticos valoran y preservan la infraestructura verde territorial, razón por la cual, los vasos de inundación son protegidos para que cumplan, entre otras, su función como áreas de almacenamiento y retardo del flujo superficial.

Sería necesario elaborar estrategias que permitan proteger los sectores todavía no urbanizados de los vasos de inundación en la Ciudad de Rosario y en cada localidad ubicada en la cuenca del Arroyo Ludueña, los cuales constituyen componentes relevantes de la infraestructura verde territorial, tanto en áreas rurales, como urbanas y periurbanas.

AGRADECIMIENTOS

Agradecemos la colaboración del Grupo AFUP (UNR, CONICET, Municipalidad de Rosario y Sub-Secretaría de Recursos Naturales de la provincia de Santa Fe), a cargo del Proyecto “Monitoreo de los

efectos de la agricultura y la silvicultura urbana y periurbana en la adaptación y mitigación del cambio climático, coordinado por el Dr. Rubén Piacentini (IFIR-UNR-CONICET) y la Dra. Marielle Dubbeling (RUAF Foundation) y subsidiado por la Red de Desarrollo del Conocimiento sobre Cambio Climático (CDKN).

REFERENCIAS

- Di Bernardo E. 2013. Propuesta para establecer un patrón de referencia de eficiencia ambiental urbano-edilicia. XXXVI ASADES Tucumán, Argentina. <http://asades.inenco.net/index.php/asades/asades2013/paper/view/1189>
- Orsolini H., Zimmermann E. y Basile P. 2008. Hidrología: Procesos y métodos. Segunda Edición. UNR Editora, 450p.
- Chow, Ven Te, Maidment, D. y Mays, L. 1988. Applied Hydrology. McGraw-Hill.
- McCuen R. 1998. Hydrology: Analysis and Design. Prentice-Hall. 2ed.
- Piacentini R, Feldman S., Coronel, A., Feldman N., Vega M., Moskat V., Bracalenti L., Zimmermann E., Lattuca A., Biasatti N. y Dubbeling M.. 2015. Agricultura urbana y periurbana y forestación como posibilidad de mitigación y adaptación al cambio climático. Estudio de caso en la ciudad de Rosario y región, Argentina. Cambio climático. Lecciones de y para ciudades de América Latina. Sylvie Nail (ed.) Universidad Externado de Colombia. ISBN 9789587724790 pp. 327-368.
- Zimmermann E., Basile P., Riccardi, G. 2001. Análisis de la Modificación en la Respuesta Hidrológica del Sistema del Arroyo Ludueña. Seminario Internacional Manejo Integral de Cuencas Hídricas. Rosario. Argentina.
- Zimmermann E. 2013. Ajuste de funciones empíricas a las IDR Regionales. Comunicación personal. Departamento de Hidráulica. FCEIA. UNR.
- Zimmermann E y Bracalenti L. 2012. Escorrentías pluviales y Regulación del Suelo en el municipio de Rosario. VI Jornadas de Ciencia y Tecnología 2012. Secretaría de Ciencia y Técnica. Universidad Nacional de Rosario.
- Zimmermann E y Bracalenti L. 2014. Reducción de riesgo de inundación urbana mediante incremento de áreas verdes. IV Taller de Regionalización de Precipitaciones Máximas. Red Argentina de Capacitación y Fortalecimiento en Gestión Integrada de los Recursos Hídricos (Arg Cap-Net). Tucumán. Argentina.

Zimmermann E. y Bracalenti L. 2015. Reducción de riesgo de inundación urbana mediante incremento de áreas ocupadas por agricultura y forestación urbana y periurbana. El caso Rosario. Informe Proyecto: Field testing of the monitoring framework, establishing monitoring baseline, design of scenarios and policy uptake in cities. Phase 2.” Climate Development Knowledge Network (CDKN) RUAF Foundation; UN Habitat. 2012-2014.

Zimmermann E, Bracalenti L, Piacentini R., Inostroza L. 2016. Urban flood risk reduction by increasing green areas for adaptation to climate change. *Procedia Engineering and World Multidisciplinary Civil Engineering-Architecture-Urban Planning Symposium*. Edit. Elsevier. (In press).

Artículo recibido el 01/2016 y aprobado para su publicación el 04/2016.