

SIMULACIÓN HIDROLÓGICA-HIDRÁULICA EN PEQUEÑAS CUENCAS DEL SUR SANTAFESINO. CASO DE ESTUDIO: CUENCAS DEL ARROYO SECO Y DEL ARROYO FRÍAS

Stenta H. R.⁽¹⁾⁽²⁾; *Riccardi G. A.*⁽¹⁾⁽²⁾⁽³⁾, *Basile P. A.*⁽¹⁾⁽²⁾

⁽¹⁾Departamento de Hidráulica-Escuela de Ingeniería Civil, Facultad de Ciencias Exactas, Ingeniería y Agrimensura, Universidad Nacional de Rosario.

⁽²⁾Centro Universitario Rosario de Investigaciones Hidroambientales, Facultad de Ciencias Exactas, Ingeniería y Agrimensura, Universidad Nacional de Rosario.

⁽³⁾Consejo de Investigaciones de la Universidad Nacional de Rosario.

E-mail: hstenta@fceia.unr.edu.ar

Resumen

Se presenta la implementación y puesta en operación de un modelo matemático distribuido, hidrológico-hidráulico físicamente basado en las cuencas de los Arroyos Seco (410 km²) y Frías (224 km²) (sur de la provincia de Santa Fe). Se evidencia un severo déficit de información de entrada al modelo, principalmente en lo que se refiere a registros de niveles o caudales y registro de precipitaciones; esta situación hace dificultoso el adecuado ajuste del modelo. Debido a lo anterior no se realizó el proceso de calibración de parámetros del modelo por ser ambas cuencas no aforadas. Para la definición de los parámetros de calibración del modelo matemático (coeficientes de resistencia al escurrimiento en cursos y en valles de inundación y coeficientes de gastos en alcantarillas, puentes y terraplenes) se utilizó bibliografía específica y parámetros calibrados en cuencas de la región con existencia de aforos. Se utilizó el modelo matemático VMMHH 1.0 (Riccardi et al., 2013) el cual ha sido ampliamente utilizado en cuencas similares obteniéndose resultados satisfactorios en la reproducción del proceso de transformación lluvia-caudal y tránsito de escurrimiento. La explotación del modelo en ambas cuencas permitió realizar la delimitación de áreas inundadas en la cuenca completa y en detalle en los sectores urbanos así como también la determinación de zonas con riesgo para vidas humanas. Estos resultados son un aporte en la planificación territorial de los recursos hídricos en la zona de estudio.

Introducción

La representación de la dinámica del escurrimiento superficial mediante modelación matemática resulta de importancia para sus diversas aplicaciones; tales como utilización en sistemas de alerta de inundaciones, delimitación de zonas de inundación, zonas de

riesgo para la vida humana, impacto de obras de infraestructura (carreteras, terraplenes), impacto de desarrollo de ciudades, evaluación y diagnóstico de la situación actual, y estudio e impactos de obras destinadas al saneamiento hídrico.

En el presente trabajo se ha avanzado en la modelación matemática del escurrimiento superficial en dos cuencas del sur de la Provincia de Santa Fe; las cuencas de los arroyos Frías y Seco. A partir de la explotación del modelo matemático en cada cuenca se han obtenidos mapas de zonas de inundación y de zonas con impacto de riesgo a la vida humana para eventos extraordinarios (Recurrencia de 100 años y 500 años).

La revisión del estado del arte indica que no se ha realizado un trabajo similar al aquí presentado en las cuencas en estudio. Respecto al mapeo de zonas de inundación existen antecedentes en la región sur de la provincia de Santa Fe. Tales antecedentes involucran la generación de zonas de impacto por inundaciones en la cuenca del A° Ludueña dentro del distrito Rosario (Riccardi, 1997; DH-FCEIA, 2001 y 2009); cuenca del A° Saladillo (dentro de la ciudad de Rosario) (Riccardi, 1997); Ciudad de San Gregorio (DH-FCEIA, 2007); Ciudad de San Lorenzo (DH-FCEIA, 2005). Respecto al mapeo de zonas de riesgo a la vida humana el antecedente en la zona se corresponde al estudio en la cuenca del A° Ludueña y Saladillo (Riccardi, 1997).

Objetivos

El objetivo principal del trabajo es avanzar en la descripción del comportamiento del escurrimiento superficial y su impacto en cuencas del sur de la provincia de Santa Fe, en este caso estudiando las cuencas de los arroyos Frías y Seco.

Materiales y métodos

Breve Descripción del Modelo Matemático

Para la modelación matemática distribuida se utilizó el sistema de modelación matemático hidrológico-hidráulico, físicamente basado y espacialmente distribuido cuasi-bidimensional, basado en un esquema de celdas interconectadas; denominado VMMHH 1.0 (Riccardi et al., 2013).

Descripción de la Cuenca del A° Frías

La cuenca del Arroyo Frías y otros cursos menores tiene un área estimada de aproximadamente 224 Km² (Sur de la Provincia de Santa Fe). Abarca las localidades de Pueblo Esther, Alvear, General Lagos, Monte Flores, Villa Amelia y Coronel Domínguez. En la modelación se incluyeron otros cursos de aguas de menores recorridos que no aportan al A° Frías pero que son de interés estudiarlos debido a que se desarrollan ya sea atravesando localidades o que son limítrofes a algún casco urbano.

Descripción de la Cuenca del A° Seco

La cuenca del Arroyo Seco y otros cursos menores tiene un área estimada de aproximadamente 410 Km² (Sur de la Provincia de Santa Fe). Abarca las localidades de Coronel Bogado, Uranga, Albarelos, Fighiera y Arroyo Seco. En la modelación se incluyeron otros cursos de aguas de menores recorridos que no aportan al A° Seco y se incorporo como limite sur del área de aporte modelada un tramo del A° Pavón. Esto se debe a que no se identificó claramente la divisoria de aguas topográfica entre el A° Seco y el A° Pavón.

En la Tabla 1 se resumen algunas características generales de las cuencas.

Tabla 1. Características generales de las cuencas.

	Cuenca A° Frías	Cuenca A° Seco
Área Total (km ²)	224	410
Cota Máxima (m IGN)	66.5	66.5
Cota Mínima (m IGN)	17.5	14
Pendiente media (m/Km)	1.70	1.85
Densidad de Drenaje (km/km ²)	0.60	0.68
Índice de Compacidad de Gravelius (-)	1.6	1.3
Índice de Rugosidad (-)	29	35
Uso predominante	Agrícola-ganadero	Agrícola-ganadero
Área Urbana total (% respecto al área de la cuenca)	5.3	1.6
Sección (m) de cursos principales previo a la descarga (ancho/profundidad)	9 m / 3.5 m	18 m / 3.5 m

Implementación del modelo matemático en ambas cuencas

El modelo quedó constituido para la cuenca del A° Frías con 89538 celdas (2682 celdas río y 86856 celdas valle) y 177986 vinculaciones. Para la cuenca del A° Seco el modelo quedó constituido con 163900 celdas (5598 celdas río y 158302 celdas valle) y 326512 vinculaciones. En ambos casos el tamaño de la celda es de 50 m de lado.

Debido a la imposibilidad de realizar la calibración (en ambas cuencas) por la inexistencia de datos registrados (tanto de precipitaciones pero en mayor medida de registros de niveles y por lo tanto de caudales) es que se realizó la adopción de parámetros del modelo (coeficientes de rugosidad de Manning en cursos y en valle de inundación; coeficiente de gastos en alcantarillas, puentes y en los terraplenes carreteros y ferroviarios que por su baja altura pueden ser sobrepasados por las aguas y actúan como vertederos de cresta ancha) en función de valores de esos parámetros calibrados en otras cuencas de la región de características similares y en base a los datos reportados en bibliografía específica.

Se utilizaron lluvias de recurrencia 100 años y 500 años, con una duración de la lluvia total de 5 días; con valores de lámina total de 294 mm y 357 mm para R=100 y 500 años, respectivamente y valores de lluvia neta de 198 mm y 253.2 mm para R=100 y 500 años, respectivamente

Mapas de inundación

Para estimar los valores de alturas de agua en las celdas del modelo que permitan representar las zonas de afectación y elaborar los mapas de inundación se adoptó la siguiente hipótesis:

- i) Zonas de inundación del sector rural (cuenca completa). Se consideró un valor de altura de agua de 0.30 m (altura de agua calculada en el modelo matemático) que representa un valor del 85 % del área en planta inundada de la celda del modelo. Por lo anterior los sectores que no se presentan como afectados no indican que no presentan algún grado de inundación, sino que las alturas de agua en dichas celdas del modelo tienen un área en planta anegada menor al 85 %.
- ii) Zonas de inundación del sector urbano. Se consideró un valor de altura de agua de 0.20 m en las celdas del modelo. Este valor de altura de agua se corresponde con un volumen de agua dentro de la celda ($170 \text{ m}^3/2500 \text{ m}^2$) que representa la siguiente

abstracción en el sector urbano: las calles inundadas como se muestra en la Figura 1.b más un 50 % del área de dominio privado con 0.10 m de altura de agua en lotes en un damero de 100 m por 100 m entre ejes de calle (Figura 1.a).

Mapas de riesgo de vidas humanas

Para la obtención de los mapas de riesgo de vidas humanas se adopto como criterio el que se tipifica como Zona de Alto Riesgo según se muestra en la Figura 1.c.

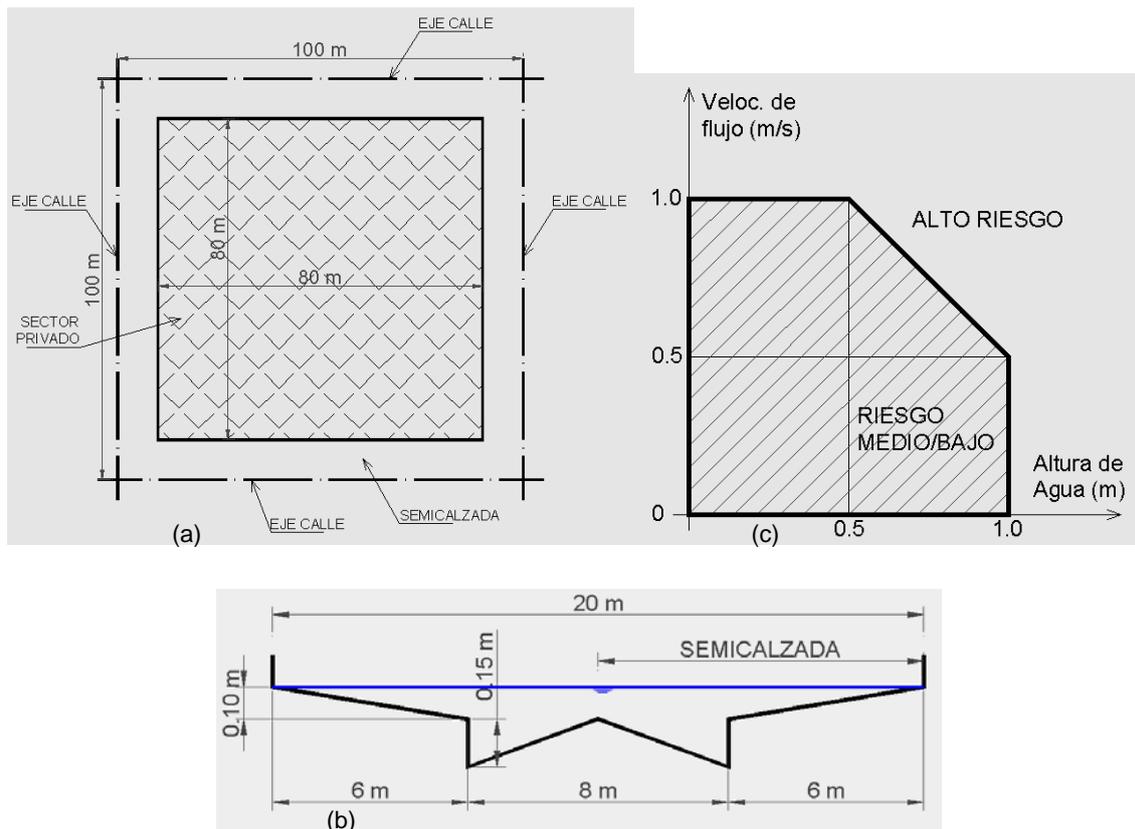


Figura 1. Criterio de zona inundada para el sector urbano (a y b) y definición de riesgo de vida humana (c).

Resultados obtenidos

Mapas de inundación (cuenca completa). En la Figura 2 se muestran los mapas de inundación para la cuenca del A° Frías obtenidos considerando en cada celda la máxima altura de agua alcanzada durante el evento analizado (R = 100 años, Figura 2.a y R = 500 años, Figura 2.b). La Figura 3 muestra los mismos resultados para la cuenca del A° Seco para R = 100 años (Figura 3.a) y R = 500 años (Figura 3.b).

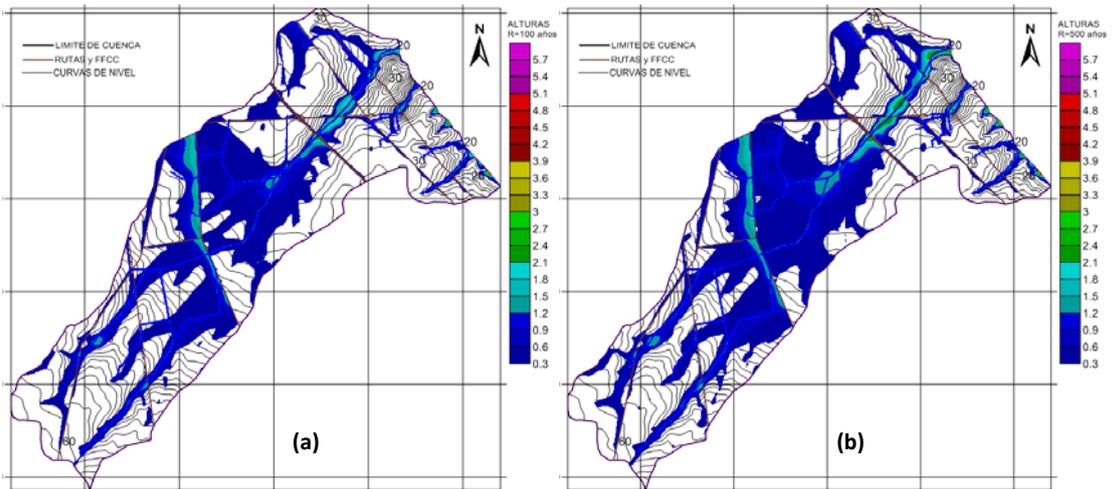


Figura 2. Mapas de alturas máximas para R = 100 años y R = 500 años. Cuenca A° Frías.

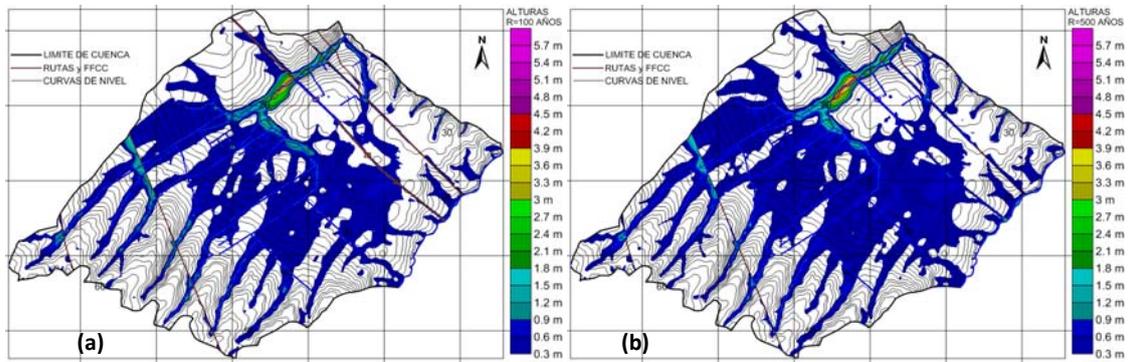


Figura 3. Mapas de alturas máximas para R = 100 años y R = 500 años. Cuenca A° Seco.

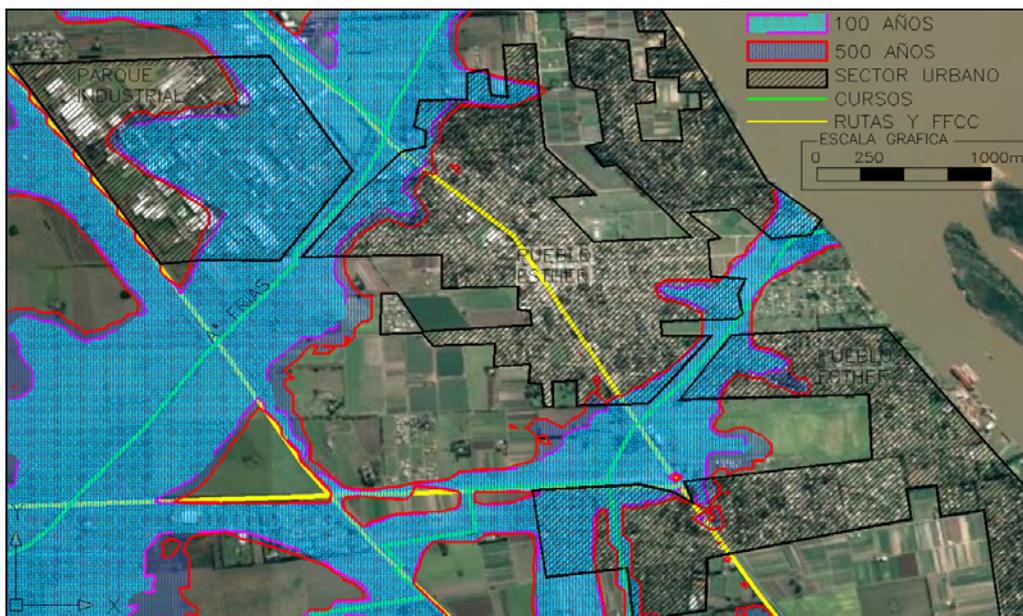


Figura 4. Mapas de inundación sector urbano para R = 100 años y R = 500 años. Cuenca A° Frías.

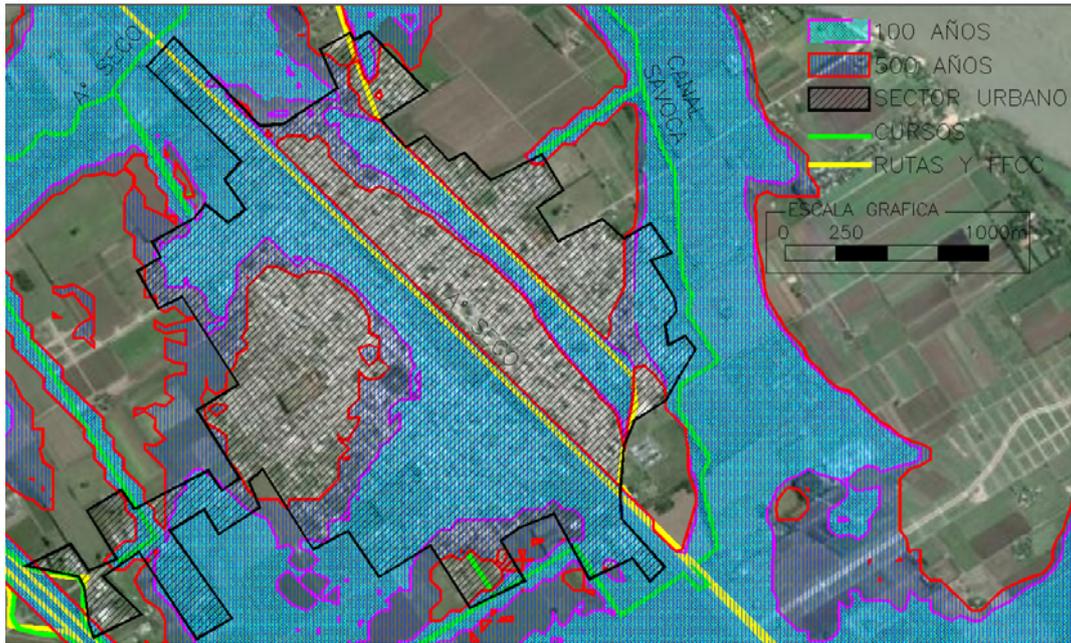


Figura 5. Mapas de inundación sector urbano para $R = 100$ años y $R = 500$ años. Cuenca A° Seco.

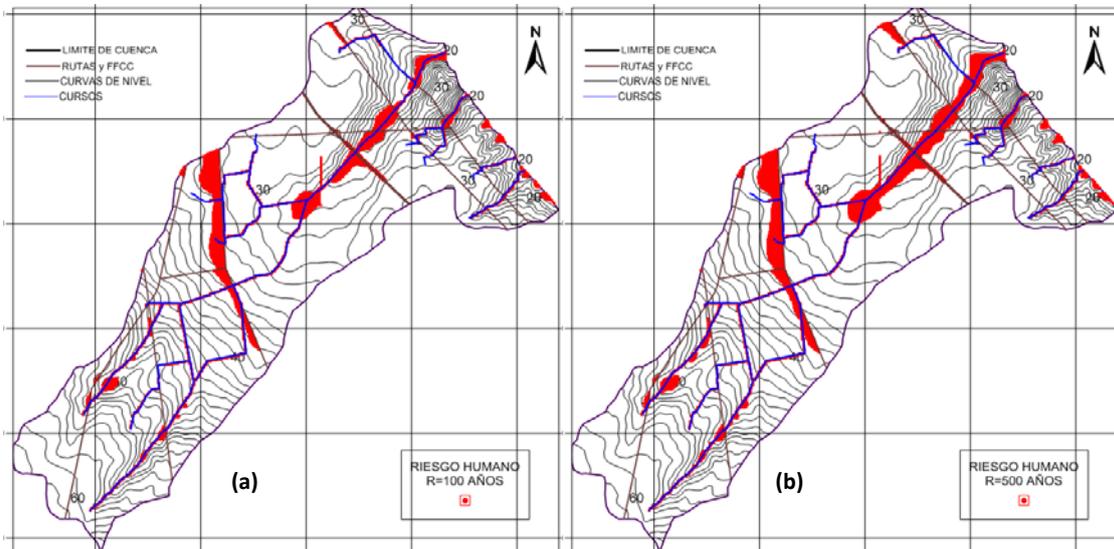


Figura 6. Mapas de riesgo humano $R = 100$ años y $R = 500$ años. Cuenca A° Frías.

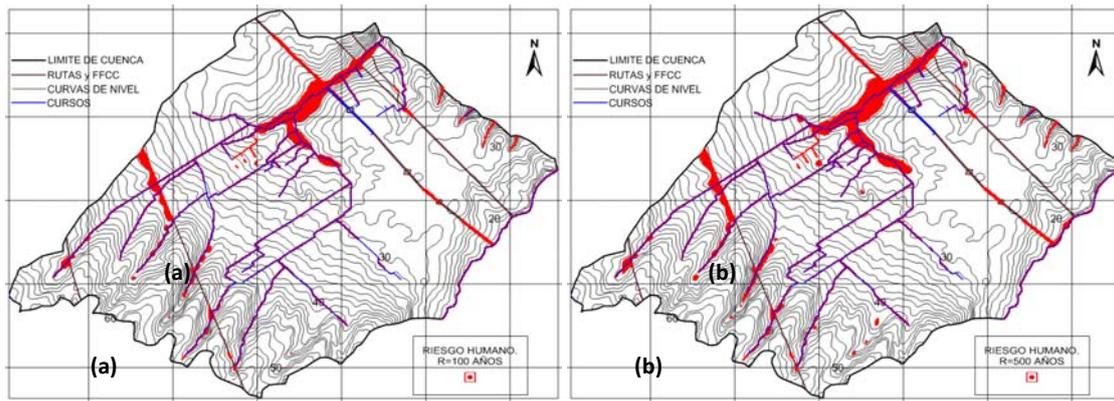


Figura 7. Mapas de riesgo humano $R = 100$ años y $R = 500$ años. Cuenca A° Seco.

Mapas de inundación en sectores bajos de la cuenca en cercanías de poblaciones. En la Figura 4 se muestra la mancha de inundación en el sector urbano y semiurbano de la localidad de Alvear y Pueblo Esther (para $R = 100$ años y 500 años). La Figura 5 muestra los mismos resultados para el sector urbano de la localidad de A° Seco.

Mapas de riesgo de vidas humanas. En este caso se elaboraron mapas para $R = 100$ y 500 años según la combinación de alturas de agua y velocidades de flujo descritas anteriormente. En la Figura 6 se muestran los resultados para la cuenca del A° Frías ($R=100$ años, Figura 6.a y $R=500$ años, Figura 6.b). La Figura 7 muestra los mismos resultados para la cuenca del A° Seco ($R=100$ años, Figura 7.a y $R=500$ años, Figura 7.b).

A modo de resumen, en la Tabla 2 se presentan los valores de área afectada por inundaciones tanto en la cuenca total, como en el sector urbano de las localidades analizadas. Se resumen también el impacto del riesgo de vidas humanas en términos porcentuales respecto al área de la cuenca estudiada.

Tabla 2. Resumen de resultados por inundaciones y riesgo de vidas humanas.

	Cuenca A° Frías		Cuenca A° Seco	
	R = 100 años	R = 500 años	R = 100 años	R = 500 años
Porcentaje de área de la cuenca con alturas \geq a 0.30 m	40	48	42	49
Porcentaje de área de la cuenca con alturas \geq a 0.80 m	9	11	6	8
Porcentaje de área de la cuenca con alturas \geq a 1.0 m	6	8	4	5
Porcentaje de área urbana y suburbana con alturas \geq a 0.20 m	22	27	46	62
Porcentaje de área de la cuenca con riesgo de vidas humanas	7	9	5	6
Porcentaje de área urbana y suburbana con riesgo de vidas humana	0.01	0.06	< 0.001	< 0.001

En términos de afectación por inundación en sectores urbanos, se evidencia que la ciudad de Arroyo Seco presenta una gran zona afectada por inundaciones (entre el 46 y 62 % del área).

Se observa que en términos porcentuales el impacto de riesgo de vidas humanas en los sectores urbanos considerados no es elevado. Los mayores riesgos se presentan en los cursos de agua naturales de importancia y en las cunetas de los caminos principales como ser rutas, autopistas y FFCC, fuera de dichos sectores no se evidencian, salvo particularidades menores, zonas con riesgo para la vida humana.

Conclusiones

Se ha logrado realizar un avance en la modelación en cuencas no aforadas mediante un modelo matemático físicamente basado. El modelo ha sido implementado con resultados satisfactorios en cuencas de características similares, por lo que se asume que los resultados alcanzados son aceptables para el nivel de información utilizada y disponible en las cuencas en estudio.

Los resultados permitieron conocer el comportamiento hídrico de las cuencas de los A° Frías y Seco y definir mapas de inundación, tanto a nivel de cuenca como en sectores urbanos de las poblaciones que potencialmente se ven afectadas por los desbordes de estos arroyos.

Además la explotación del modelo permitió obtener mapas de riesgo de vida humana, para los escenarios considerados que corresponden a recurrencias de 100 años y 500 años.

Estos resultados son de utilidad para las autoridades públicas de los municipios involucrados para tener en consideración las posibles zonas de mayor vulnerabilidad ante crecidas de ambos arroyos.

Futuros estudios incorporarán otras cuencas del sur de la Provincia de Santa Fe y la determinación de mapas de permanencias de aguas y tensiones de corte de fondo; por ejemplo para su utilización en la cuantificación de la erosión general a nivel de cuenca.

Debido a la inexistencia de registros es necesario remarcar la necesidad de incorporar infraestructura para recolección de información hidrometeorológica (niveles, caudales, precipitaciones, etc.) que permitirá tener mayor certeza en las predicciones del modelo.

Agradecimientos. A la UNR por el apoyo brindado en el marco de los PID-UNR: 1ING 509 y 1ING 514.

Referencias bibliográficas

1. DH-FCEIA. 2001. “Áreas Inundables en el Sistema Hídrico del Arroyo Ludueña mediante Modelación Matemática Hidrodinámica”. Convenio entre FCEIA-UNR y Munic. de Rosario.
2. DH-FCEIA. 2005. “Plan director de los desagües pluviales de la Ciudad de San Lorenzo”. Convenio entre FCEIA-UNR y Municipalidad de San Lorenzo.
3. DH-FCEIA. 2007. “Plan director de los desagües pluviales de la comuna de San Gregorio”. Convenio entre FCEIA-UNR y comuna de San Gregorio.
4. DH-FCEIA. 2009. “Manchas de inundación en el sistema hídrico del arroyo Ludueña para eventos hidrológicos extremos dentro del distrito Rosario”. Convenio FCEIA-UNR y Munic.de Rosario.
5. Riccardi, G.1997.“The flood propagation modelling for the management of flood plains of Rosario Region, Argentina”, *River Flood Hydraulics*, J. Watts, ed., UK, 127-136.
6. Riccardi, G., Stenta, H., Scuderi, C., Basile, P., Zimmermann, E., Trivisonno, F. 2013. “Aplicación de un modelo hidrológico-hidráulico para el pronóstico de niveles de agua en tiempo real”, *Tecnología y Ciencias del Agua*, vol. IV, núm. 1, pp. 83-105.