

# CARACTERIZACIÓN DE LA CAPACIDAD DE RESPUESTA DEL SISTEMA DE DRENAJE DE LA CUENCA URBANA SAN JUAN – JIMÉNEZ

84.99 - Trabajo profesional de Ingeniería Civil

Marina Lagos

Tutores:

Ing. Mag. Mariano RE

Ing. Leandro KAZIMIERSKI

Marzo de 2021

# Índice general

|                                                                        |           |
|------------------------------------------------------------------------|-----------|
| <b>1. Objetivos</b>                                                    | <b>9</b>  |
| 1.1. Objetivo general . . . . .                                        | 9         |
| 1.2. Objetivos específicos . . . . .                                   | 9         |
| 1.3. Marco . . . . .                                                   | 10        |
| <b>2. Caracterización de la cuenca</b>                                 | <b>11</b> |
| 2.1. Características generales . . . . .                               | 11        |
| 2.2. Características físicas . . . . .                                 | 17        |
| 2.2.1. Topografía . . . . .                                            | 17        |
| 2.2.2. Red de drenaje . . . . .                                        | 19        |
| 2.2.3. Cobertura del suelo . . . . .                                   | 22        |
| 2.3. Problemática . . . . .                                            | 24        |
| 2.3.1. Antecedentes . . . . .                                          | 24        |
| 2.3.2. Descripción de la problemática . . . . .                        | 24        |
| <b>3. Metodología</b>                                                  | <b>27</b> |
| 3.1. Implementación del modelo . . . . .                               | 27        |
| 3.1.1. Modelo EPA-SWMM . . . . .                                       | 27        |
| 3.1.2. Generación del modelo . . . . .                                 | 30        |
| 3.1.3. Caracterización de los elementos del modelo . . . . .           | 31        |
| 3.2. Análisis de estabilidad . . . . .                                 | 36        |
| 3.2.1. Estrategias de control . . . . .                                | 36        |
| 3.2.2. Oscilaciones remanentes . . . . .                               | 40        |
| 3.2.3. Control de calidad . . . . .                                    | 42        |
| 3.3. Calibración y validación . . . . .                                | 42        |
| 3.3.1. Datos . . . . .                                                 | 43        |
| 3.3.2. Eventos . . . . .                                               | 46        |
| 3.3.3. Análisis de sensibilidad . . . . .                              | 53        |
| 3.3.4. Calibración . . . . .                                           | 57        |
| 3.3.5. Validación . . . . .                                            | 60        |
| <b>4. Simulaciones realizadas</b>                                      | <b>63</b> |
| 4.1. Corridas múltiples . . . . .                                      | 63        |
| 4.1.1. Mapas espaciales asociados a eventos de precipitación . . . . . | 63        |
| 4.1.2. Mapas espaciales de duración . . . . .                          | 64        |
| 4.1.3. Gráficos intensidad-duración . . . . .                          | 65        |
| 4.1.4. Gráfico intensidad-duración resumen . . . . .                   | 67        |
| 4.2. Escenarios plausibles . . . . .                                   | 68        |
| 4.2.1. Inundación La Plata - 2013 . . . . .                            | 68        |
| 4.2.2. Aumento de impermeabilidad . . . . .                            | 68        |



|                                |           |
|--------------------------------|-----------|
| <b>5. Resultados obtenidos</b> | <b>71</b> |
| <b>6. Conclusiones</b>         | <b>86</b> |

# Índice de figuras

|                                                                                                                                                                  |    |
|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| 2.1. Cuencas de la Vertiente Sur. . . . .                                                                                                                        | 11 |
| 2.2. Cuenca y partidos. . . . .                                                                                                                                  | 12 |
| 2.3. Cuenca y localidades. . . . .                                                                                                                               | 12 |
| 2.4. Presión antrópica sobre el arroyo San Juan. Fuente: Google Earth. . . . .                                                                                   | 12 |
| 2.5. Imagen satelital de la cuenca. Fuente: Google Maps. . . . .                                                                                                 | 13 |
| 2.6. Principales vías de comunicación. . . . .                                                                                                                   | 13 |
| 2.7. Mapas de información censal relevante. Fuente: elaboración propia en base a datos del Censo Nacional de Población, Hogares y Viviendas 2010, INDEC. . . . . | 14 |
| 2.8. Clasificación de viviendas. Fuente: elaboración propia en base a datos del Censo Nacional de Población, Hogares y Viviendas 2010, INDEC. . . . .            | 15 |
| 2.9. Barrios populares. Fuente: RENABAP 2018. . . . .                                                                                                            | 16 |
| 2.10. Ejemplos representativos de viviendas. Fuente: Google Earth. . . . .                                                                                       | 17 |
| 2.11. Mapa de cobertura de los distintos MDE que ofrece el IGN. . . . .                                                                                          | 18 |
| 2.12. Modelo digital del terreno. . . . .                                                                                                                        | 19 |
| 2.13. Red de drenaje. . . . .                                                                                                                                    | 20 |
| 2.14. Arroyo Jiménez. Foto: INA. . . . .                                                                                                                         | 21 |
| 2.15. Imagen obtenida con Street View. . . . .                                                                                                                   | 21 |
| 2.16. Avance de la mancha urbana. Fuente: Google Earth. . . . .                                                                                                  | 22 |
| 2.17. Clasificación de cobertura de suelo en seis manzanas representativas de la zona urbanizada<br>2. . . . .                                                   | 23 |
| 2.18. Imágen satelital actual y ráster de impermeabilidad. . . . .                                                                                               | 24 |
| 2.19. Av. Calchaquí y av. Bosques, febrero 2013. Fuente: YouTube “El Radar del Sur”. . . . .                                                                     | 25 |
| 2.20. Paso bajo nivel Hernández-Smith inundado, Ezpeleta. Fuente: YouTube. . . . .                                                                               | 26 |
| 2.21. Metrobus de Florencio Varela inundado. Fuente: Facebook “Vecinos Varelenses”. . . . .                                                                      | 26 |
| 2.22. Anegamiento en acceso a escuela. Fuente: Facebook “Vecinos Varelenses”. . . . .                                                                            | 26 |
| 3.1. Capas del modelo EPA-SWMM. . . . .                                                                                                                          | 28 |
| 3.2. Esquema de modelación de subcuenca como depósito no lineal. . . . .                                                                                         | 29 |
| 3.3. Representación esquemática de los elementos que componen el modelo. . . . .                                                                                 | 32 |
| 3.4. Imágen satelital (Fuente: Google Earth) y esquema del modelo SWMM. . . . .                                                                                  | 33 |
| 3.5. Ejemplo de sección transversal adoptada para calles. . . . .                                                                                                | 34 |
| 3.6. Determinación de la curva de almacenamiento. . . . .                                                                                                        | 36 |
| 3.7. Serie temporal de nivel en un conducto que evidencia problemas de estabilidad. . . . .                                                                      | 36 |
| 3.8. Serie temporal de nivel en un conducto con factor de paso temporal igual a 0,50 y 0,75. . . . .                                                             | 37 |
| 3.9. Cambios en la serie temporal de nivel en un nodo variando el número de Courant y el<br>paso temporal de cálculo. . . . .                                    | 39 |
| 3.10. Series de caudal en conductos antes y después de imponer una pendiente mínima. . . . .                                                                     | 39 |
| 3.11. Hidrograma de la Figura 3.9 luego de imponer una pendiente mínima de 0,1 %. . . . .                                                                        | 40 |
| 3.12. Series temporales para el análisis de un orificio en particular. . . . .                                                                                   | 41 |
| 3.13. Ejemplo de gráfico para control de calidad de los resultados de una simulación. . . . .                                                                    | 42 |
| 3.14. Estaciones meteorológicas y sensor de nivel. . . . .                                                                                                       | 44 |
| 3.15. Sensor de nivel ubicado en el predio de Defensa y Justicia. Foto: Meteovarela. . . . .                                                                     | 45 |

|                                                                                                                                                    |    |
|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| 3.16. Subcuencas. . . . .                                                                                                                          | 46 |
| 3.17. Evento 13 de junio de 2019. Precipitación acumulada y PMA. . . . .                                                                           | 47 |
| 3.18. Evento 1 de octubre de 2019. Precipitación acumulada y PMA. . . . .                                                                          | 48 |
| 3.19. Evento 11 de octubre de 2019. Precipitación acumulada y PMA. . . . .                                                                         | 48 |
| 3.20. Evento 17 de octubre de 2019. Precipitación acumulada y PMA. . . . .                                                                         | 49 |
| 3.21. Evento 30 de diciembre de 2019. Precipitación acumulada y PMA. . . . .                                                                       | 49 |
| 3.22. Evento 13 de junio de 2019. Grilla de precipitación acumulada. . . . .                                                                       | 50 |
| 3.23. Evento 1 de octubre de 2019. Grilla de precipitación acumulada. . . . .                                                                      | 50 |
| 3.24. Evento 11 de octubre de 2019. Grilla de precipitación acumulada. . . . .                                                                     | 51 |
| 3.25. Evento 17 de octubre de 2019. Grilla de precipitación acumulada. . . . .                                                                     | 51 |
| 3.26. Evento 30 de diciembre de 2019. Grilla de precipitación acumulada. . . . .                                                                   | 52 |
| 3.27. Hietogramas e hidrogramas de nivel en el arroyo San Juan, correspondientes a los cinco eventos de trabajo. . . . .                           | 53 |
| 3.28. Resultados ensayos de sensibilidad a parámetros hidrológicos seleccionados. . . . .                                                          | 54 |
| 3.29. Resultados ensayos de sensibilidad a parámetros hidráulicos seleccionados. . . . .                                                           | 55 |
| 3.30. Variaciones en el hidrograma de nivel simulado al modificar el coeficiente de Manning correspondiente a conductos, canales y calles. . . . . | 56 |
| 3.31. Variaciones en el hidrograma de nivel simulado al modificar los parámetros de calibración. . . . .                                           | 57 |
| 3.32. Eventos seleccionados para la calibración. . . . .                                                                                           | 57 |
| 3.33. Resultados de la calibración. . . . .                                                                                                        | 59 |
| 3.34. Resultados de ensayos de sensibilidad frente a variaciones en el forzante. . . . .                                                           | 60 |
| 3.35. Resultados de la validación. . . . .                                                                                                         | 61 |
| 3.36. Validación a partir de publicaciones en Facebook y reclamos al municipio de Florencio Varela. . . . .                                        | 62 |
| 3.37. Comparación con zonas inundables trazadas por el municipio de Florencio Varela. . . . .                                                      | 62 |
| 4.1. Ejemplo de mapa espacial asociado a un evento sintético. Variable: altura de agua en calle. . . . .                                           | 64 |
| 4.2. Ejemplo de mapa espacial asociado a un evento sintético. Variable: capacidad superada en conductos y canales. . . . .                         | 64 |
| 4.3. Ejemplo de mapa espacial de duración. Evento adverso: altura en calle por encima de 0,30 m (ingreso de agua en las viviendas). . . . .        | 65 |
| 4.4. Ejemplo de mapa espacial de duración. Evento adverso: capacidad superada en conductos y canales. . . . .                                      | 65 |
| 4.5. Ejemplo de gráfico intensidad-duración. Variable: altura de agua en calle. . . . .                                                            | 66 |
| 4.6. Ejemplo de gráfico intensidad-duración. Variable: relación tirante máximo y tirante a sección llena. . . . .                                  | 66 |
| 4.7. Gráfico intensidad-duración con isolíneas de precipitación acumulada superpuestas. . . . .                                                    | 67 |
| 4.8. Gráfico intensidad-duración resumen. . . . .                                                                                                  | 67 |
| 4.9. Hietograma del 2 de abril de 2013. Observatorio Astronómico (UNLP). . . . .                                                                   | 68 |
| 4.10. Avance de la mancha urbana. . . . .                                                                                                          | 69 |
| 4.11. Avance de la mancha urbana por partidos. . . . .                                                                                             | 69 |
| 5.1. Mapa de duración hasta alcanzar la capacidad en conductos y canales, siendo intensidad = 15 mm/h. . . . .                                     | 74 |
| 5.2. Mapa de duración hasta alcanzar la capacidad en conductos y canales, siendo intensidad = 20 mm/h. . . . .                                     | 74 |
| 5.3. Mapa de duración hasta alcanzar la altura de superación de muebles, siendo intensidad = 25 mm/h. . . . .                                      | 75 |
| 5.4. Mapa de duración hasta alcanzar la altura de riesgo de ahogamiento en niños, siendo intensidad = 30 mm/h. . . . .                             | 75 |
| 5.5. Gráfico intensidad-duración en un tramo a cielo abierto del arroyo San Juan. . . . .                                                          | 75 |
| 5.6. Gráfico intensidad-duración en un tramo a cielo abierto del arroyo San Juan. . . . .                                                          | 76 |
| 5.7. Gráfico intensidad-duración en un tramo a cielo abierto del arroyo San Juan. . . . .                                                          | 76 |

|                                                                                                                                                         |    |
|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| 5.8. Gráfico intensidad-duración en un tramo entubado del arroyo Jiménez. . . . .                                                                       | 77 |
| 5.9. Gráfico intensidad-duración en un tramo a cielo abierto del arroyo Jiménez. . . . .                                                                | 77 |
| 5.10. Gráfico intensidad-duración en un tramo entubado del arroyo Jiménez. . . . .                                                                      | 78 |
| 5.11. Gráfico intensidad-duración en un tramo entubado del arroyo Jiménez. . . . .                                                                      | 78 |
| 5.12. Gráfico intensidad-duración inmediatamente aguas abajo de la confluencia de los arroyos<br>entubados San Juan y Jiménez. . . . .                  | 79 |
| 5.13. Gráfico intensidad-duración en el tramo del arroyo San Juan donde se encuentra ubicado<br>el sensor de nivel. . . . .                             | 79 |
| 5.14. Gráfico intensidad-duración en el conducto ubicado en la cuadra del Hospital Mi Pueblo. .                                                         | 80 |
| 5.15. Gráfico intensidad-duración en el tramo final del entubamiento del arroyo Jiménez. . . . .                                                        | 80 |
| 5.16. Gráfico intensidad-duración en el tramo final a cielo abierto del arroyo Jiménez. . . . .                                                         | 81 |
| 5.17. Gráfico intensidad-duración resumen. . . . .                                                                                                      | 81 |
| 5.18. Gráfico intensidad-duración resumen y curvas IDF superpuestas. . . . .                                                                            | 82 |
| 5.19. Gráfico intensidad-duración resumen asociado a la situación de los canales. . . . .                                                               | 83 |
| 5.20. Gráfico intensidad-duración resumen asociado a la situación de los conductos. . . . .                                                             | 83 |
| 5.21. Situación superficial para el evento de La Plata - 2013. . . . .                                                                                  | 83 |
| 5.22. Situación del sistema de desagües pluviales para el evento de La Plata - 2013. . . . .                                                            | 83 |
| 5.23. Hietograma y evolución del porcentaje de sistema de drenaje colapsado, correspondientes<br>a la simulación del evento de La Plata (2013). . . . . | 84 |
| 5.24. Situación superficial en escenario actual. . . . .                                                                                                | 85 |
| 5.25. Situación superficial en escenario +20 %. . . . .                                                                                                 | 85 |
| 6.1. Tablero interactivo para visualización de productos. . . . .                                                                                       | 87 |

# Índice de tablas

|                                                                                                                              |    |
|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| 2.1. Descripción de indicadores de calidad de vivienda. . . . .                                                              | 15 |
| 2.2. Porcentaje de impermeabilidad correspondiente a cada zona. . . . .                                                      | 23 |
| 3.1. Datos de entrada de ConuPy. . . . .                                                                                     | 30 |
| 3.2. Número de elementos del modelo. . . . .                                                                                 | 31 |
| 3.3. Parámetros de las subáreas. . . . .                                                                                     | 33 |
| 3.4. Parámetros de infiltración de Greem-Ampt. . . . .                                                                       | 34 |
| 3.5. Valores de rugosidad adoptados. . . . .                                                                                 | 35 |
| 3.6. Caudal erogado por un sumidero en función de la carga hidráulica. . . . .                                               | 41 |
| 3.7. Estaciones meteorológicas. . . . .                                                                                      | 43 |
| 3.8. Conjunto de parámetros analizados en los ensayos de sensibilidad. . . . .                                               | 54 |
| 3.9. Indicadores de performance evaluados. . . . .                                                                           | 58 |
| 3.10. Indicadores de performance para los eventos de calibración. . . . .                                                    | 59 |
| 3.11. Indicadores de performance para los eventos de validación. . . . .                                                     | 61 |
| 5.1. Duraciones e intensidades para eventos ordinarios y de 2 años de recurrencia. . . . .                                   | 71 |
| 5.2. Situación superficial para eventos ordinarios y de 2 años de recurrencia. . . . .                                       | 72 |
| 5.3. Situación del sistema de desagües pluviales para eventos ordinarios y de 2 años de recurrencia. . . . .                 | 73 |
| 5.4. Grado de afectación del sistema asociado a distintos periodos de recurrencia. . . . .                                   | 82 |
| 5.5. Principales componentes del balance hídrico para la comparación de escenarios de aumento<br>de impermeabilidad. . . . . | 84 |
| 6.1. Datos relevantes del gráfico intensidad-duración resumen. . . . .                                                       | 87 |

# Siglas

**ACUMAR** Autoridad de Cuenca Matanza Riachuelo.

**API** Application Programming Interfaces.

**CART** Classification And Regression Tree.

**DPE** Dirección Provincial de Estadística.

**DPH** Dirección Provincial de Hidráulica.

**DS** Directional Symmetry.

**EPA** Environmental Protection Agency.

**GEE** Google Earth Engine.

**GIS** Geographic Information System.

**IDF** Intensidad - Duración - Frecuencia.

**IDW** Inverse Distance Weighted.

**IGN** Instituto Geográfico Nacional.

**INA** Instituto Nacional del Agua.

**INDEC** Instituto Nacional de Estadística y Censos.

**LHA** Laboratorio de Hidráulica Aplicada.

**MDE** modelo digital de elevación.

**MDT** modelo digital de terreno.

**NBI** necesidades básicas insatisfechas.

**NSE** Nash-Sutcliffe efficiency.

**PE** Peak Error.

**PHC** Programa de Hidráulica Computacional.

**PMA** precipitación media areal.

**POI** point of interest.

**RENABAP** Registro Nacional de Barrios Populares.

**RMBA** Región Metropolitana de Buenos Aires.

**RMSE** Root Mean Square Error.

**SIG** Sistema de Información Geográfica.

**SIMATH** Sistema Integrado de Monitoreo y Alerta Temprana Hidroambiental.

**SINARAME** Sistema Nacional de Radares Meteorológicos.

**SIyAH** Subgerencia de Sistemas de Información y Alerta Hidrológico.

**SWMM** Storm Water Management Model.

**UN** United Nations.

**UNLP** Universidad Nacional de La Plata.

**WMO** World Meteorological Organization.

# Capítulo 1

## Objetivos

### 1.1. Objetivo general

El objetivo general de este trabajo consiste en realizar un diagnóstico de la capacidad de respuesta de la cuenca urbana San Juan – Jiménez ubicada en la Región Metropolitana de Buenos Aires (RMBA), Conurbano Sur. La misma cuenta actualmente con una serie de obras hidráulicas capaces de gestionar, en términos generales, adecuadamente el volumen precipitado durante eventos ordinarios. Se pretende caracterizar los eventos a partir de los cuales la situación del sistema de drenaje se vuelve crítica.

Este objetivo responde a la primera de las ocho ambiciones a largo plazo establecidas para la gestión hídrica en el 18º Congreso Meteorológico Mundial: *Nadie debe verse sorprendido por una inundación* [WMO, 2019].

### 1.2. Objetivos específicos

Se identifican tres objetivos específicos: crear un modelo de alta resolución de la cuenca, generar productos útiles a partir de ese modelo y analizar el comportamiento de la cuenca frente a distintos escenarios.

La creación del modelo hidráulico-hidrológico se considera un objetivo en sí mismo, ya que además de ser necesario para cumplir los objetivos específicos restantes, se espera que sea lo suficientemente robusto para ser utilizado en futuros proyectos relacionados con la cuenca y la región.

La generación de productos útiles implica la puesta a prueba del sistema de drenaje mediante múltiples simulaciones. Con cada simulación se estudia la respuesta de la cuenca a un evento particular caracterizado por una intensidad de precipitación y una duración específicas. A partir de este gran número de simulaciones se obtiene un importante volumen de información. Se busca sintetizar toda esa información en productos que puedan ser utilizados tanto por los servicios vinculados a la protección civil como por los tomadores de decisiones de los municipios involucrados.

Por último, se analiza el comportamiento de la cuenca frente a distintos escenarios. Los escenarios a considerar tienen en cuenta dos problemáticas actuales: el incremento de la urbanización con la consecuente impermeabilización de la cuenca y la intensificación de los eventos extremos cada vez más frecuentes en un contexto de cambio climático.



### **1.3. Marco**

Este trabajo se desarrolla en el marco del proyecto “Inundaciones en cuencas urbanas: comprender la dinámica del agua para contribuir a la implementación de medidas no estructurales” del Programa de Hidráulica Computacional (PHC) del Laboratorio de Hidráulica Aplicada (LHA) del Instituto Nacional del Agua (INA).

## Capítulo 2

# Caracterización de la cuenca

A continuación se detallan las características generales y físicas consideradas relevantes para la realización de este estudio y luego se realiza una breve descripción de la problemática asociada a la situación actual de su sistema de drenaje.

### 2.1. Características generales

La cuenca San Juan – Jiménez es una de las cuencas de la Vertiente Sur (Figura 2.1) que drenan sus aguas hacia el Río de la Plata. Se encuentra en el Conurbano Sur de la RMBA ocupando parte de los partidos de Quilmes, Florencio Varela y Berazategui (Figura 2.2). Cuenta con una superficie aproximada de 75 km<sup>2</sup> y dentro de sus límites viven alrededor de 420.000 personas.

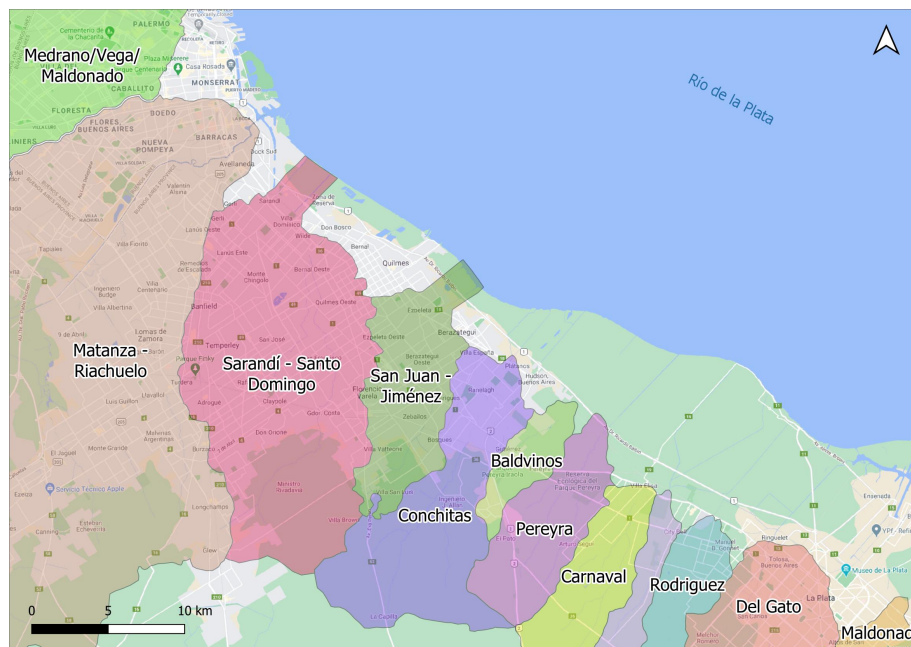


Figura 2.1: Cuencas de la Vertiente Sur.



Figura 2.2: Cuenca y partidos.

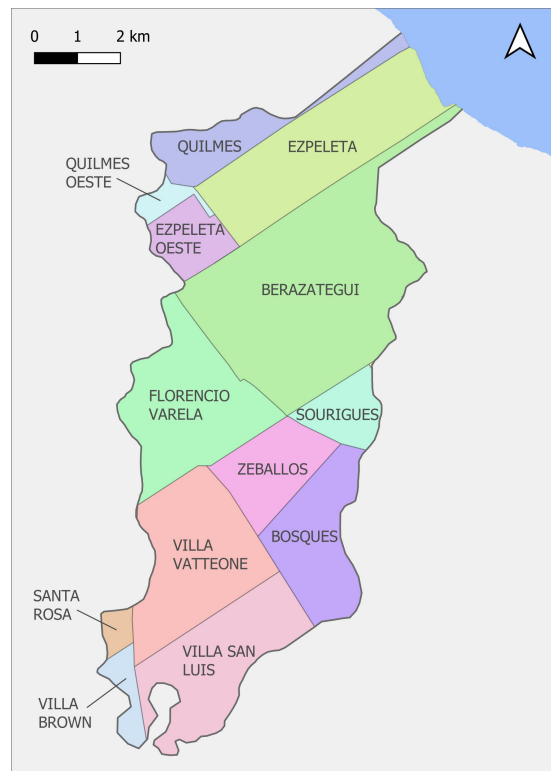


Figura 2.3: Cuenca y localidades.

Comparten el territorio de la cuenca catorce localidades (Figura 2.3) entre las cuales se destacan Florencio Varela, Berazategui y Quilmes por ser las localidades cabeceras de los partidos homónimos.

Es un cuenca con una fuerte intervención antrópica: se encuentra urbanizada en un 70 % y sus arroyos principales se encuentran entubados en gran parte de su longitud. En la Figura 2.4 se aprecia la presión antrópica que sufren algunos tramos a cielo abierto de los arroyos. La ocupación de las márgenes y de los valles de inundación agravan las problemáticas hídricas. En la imagen satelital de la Figura 2.5 se distingue la elevada proporción de área urbana sobre el área total de la cuenca.



Figura 2.4: Presión antrópica sobre el arroyo San Juan. Fuente: Google Earth.



Figura 2.5: Imagen satelital de la cuenca. Fuente: Google Maps.

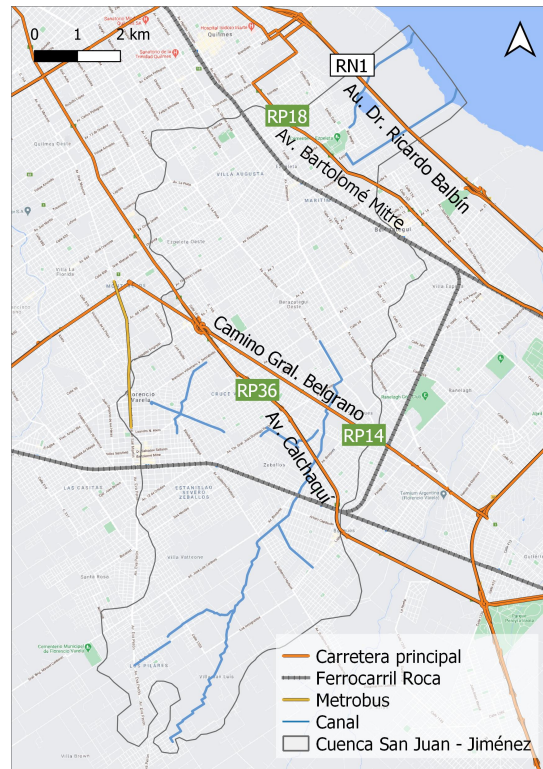


Figura 2.6: Principales vías de comunicación.

La cuenca es atravesada por las vías del tren tanto en la cuenca baja (línea Roca, ramal Constitución – La Plata) como en la cuenca media-alta (línea Roca, ramal Constitución – Gutiérrez vía Temperley). En cuanto al transporte carretero, la atraviesan la RN1 (Au. Dr. Ricardo Balbín) y tres rutas provinciales: la Av. Bartolomé Mitre (RP18), el Camino Gral. Belgrano (RP14) y la Av. Calchaquí (RP36). Estas dos últimas intersecan el arroyo San Juan en su tramo a cielo abierto. Por otro lado, un tramo del Metrobus de Florencio Varela de aproximadamente 900 m tiene lugar en las proximidades del límite Oeste de la cuenca. En la Figura 2.6 se exponen las trazas de las vías de comunicación anteriormente mencionadas.

En cuanto a las condiciones de vida de sus habitantes, en la Figura 2.7 se presentan mapas elaborados a partir de los datos del Censo Nacional de Población, Hogares y Viviendas realizado en 2010 por el Instituto Nacional de Estadística y Censos (INDEC). De acuerdo a la información relevada ese año, en el área de la cuenca la densidad demográfica era de 56 hab/ha y el 14,7 % de los hogares presentaban al menos algún indicador de necesidades básicas insatisfechas (NBI). Los cinco indicadores de NBI hacen referencia a las condiciones de la vivienda, las condiciones sanitarias, el hacinamiento, la asistencia escolar y la capacidad de subsistencia. Por otra parte, la clasificación del total de las 111 mil viviendas particulares habitadas de la cuenca, según la calidad constructiva y la calidad de conexión a servicios básicos, se muestra en la Figura 2.8. La Tabla 2.1 incluye las descripciones correspondientes a cada clasificación.



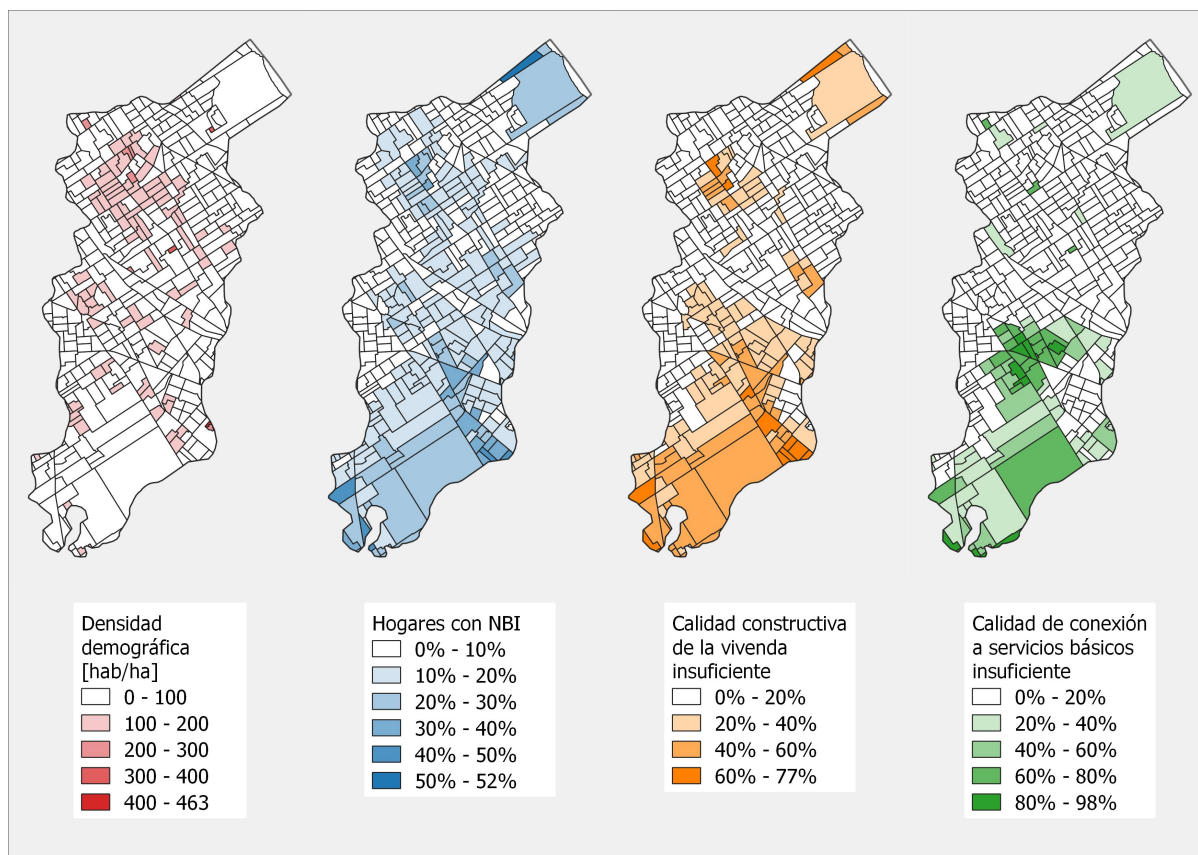


Figura 2.7: Mapas de información censal relevante. Fuente: elaboración propia en base a datos del Censo Nacional de Población, Hogares y Viviendas 2010, INDEC.

La zona de mayor densidad demográfica (por encima de 100 hab/ha) se encuentra en la cuenca media-baja ocupando parte de las localidades de Ezpeleta, Ezpeleta Oeste y Berazategui. Tanto la zona de la ribera del Río de la Plata como la zona rural en la cuenca alta no superan los 15 hab/ha. Se puede apreciar una marcada concordancia entre el mapa de hogares con al menos un indicador de NBI y el mapa de viviendas con calidad constructiva insuficiente. En esos aspectos se ven afectadas principalmente la cuenca alta y la cuenca baja, y en especial las localidades de Ezpeleta, Bosques y Zeballos. Si se analiza en cambio la calidad de conexión a servicios básicos, según procedencia del agua y tipo de desagüe (Tabla 2.1) las viviendas afectadas se concentran en la cuenca media-alta entorno a la intersección de la avenida Guillermo Hudson y las vías donde limitan las localidades de Florencio Varela, Zeballos y Villa Vatteone.

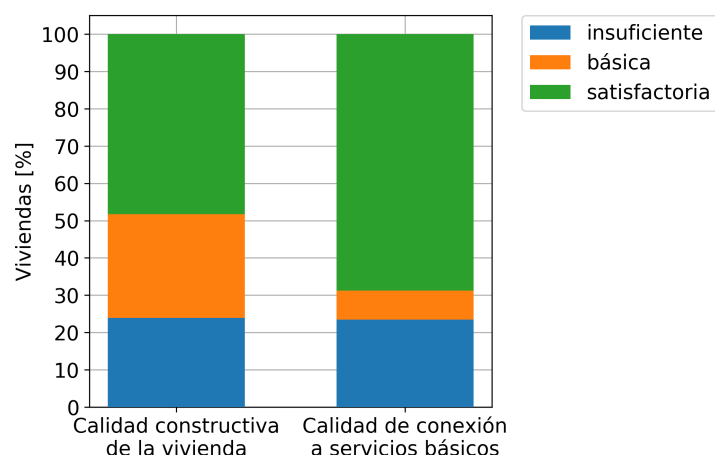


Figura 2.8: Clasificación de viviendas. Fuente: elaboración propia en base a datos del Censo Nacional de Población, Hogares y Viviendas 2010, INDEC.

| Variable censal                         | Rótulo y descripción                                                                                                                                                                                                      |
|-----------------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Calidad constructiva de la vivienda     | <b>Satisfactoria:</b> refiere a las viviendas que disponen de materiales resistentes, sólidos y con la aislación adecuada. A su vez también disponen de cañerías dentro de la vivienda y de inodoro con descarga de agua. |
|                                         | <b>Básica:</b> no cuentan con elementos adecuados de aislación o tienen techo de chapa o fibrocemento. Al igual que el anterior, cuentan con cañerías dentro de la vivienda y de inodoro con descarga de agua.            |
|                                         | <b>Insuficiente:</b> engloba a las viviendas que no cumplen ninguna de las 2 condiciones anteriores.                                                                                                                      |
| Calidad de conexión a servicios básicos | <b>Satisfactoria:</b> refiere a las viviendas que disponen de agua a red pública y desagüe cloacal.                                                                                                                       |
|                                         | <b>Básica:</b> describe la situación de aquellas viviendas que disponen de agua de red pública y el desagüe a pozo con cámara séptica.                                                                                    |
|                                         | <b>Insuficiente:</b> engloba a las viviendas que no cumplen ninguna de las 2 condiciones anteriores.                                                                                                                      |

Tabla 2.1: Descripción de indicadores de calidad de vivienda.

Más del 50 % de las viviendas no dispone de materiales resistentes con aislación adecuada y casi 1 de cada 4 viviendas no alcanza las condiciones básicas de calidad constructiva (cañerías dentro de la vivienda e inodoro con descarga de agua). Por otro lado, casi el 69 % cuenta con conexión tanto a la red de agua como a la red cloacal (calidad de conexión a servicios básicos satisfactoria) y esa cifra se amplía hasta el 76,5 % si además se contabilizan las viviendas que cuentan con agua de red y cámara séptica (calidad básica). La calidad de las conexiones del 23,5 % restante de las viviendas resulta insuficiente.

Distribuidos a lo largo de toda la cuenca se localizan 34 barrios populares (Figura 2.9) en los cuales viven más de 6800 familias. Esta información surge del Registro Nacional de Barrios Populares (RENABAP) del año 2018 realizado entre diferentes áreas del gobierno nacional y distintas entidades y organizaciones sociales. El mismo considera *barrio popular* a los barrios vulnerables en los que viven al menos 8 familias agrupadas o contiguas, donde más de la mitad de la población no cuenta con título de propiedad del suelo ni acceso regular a dos, o más, de los servicios básicos (red de agua corriente, red de energía eléctrica con medidor domiciliario y/o red cloacal).

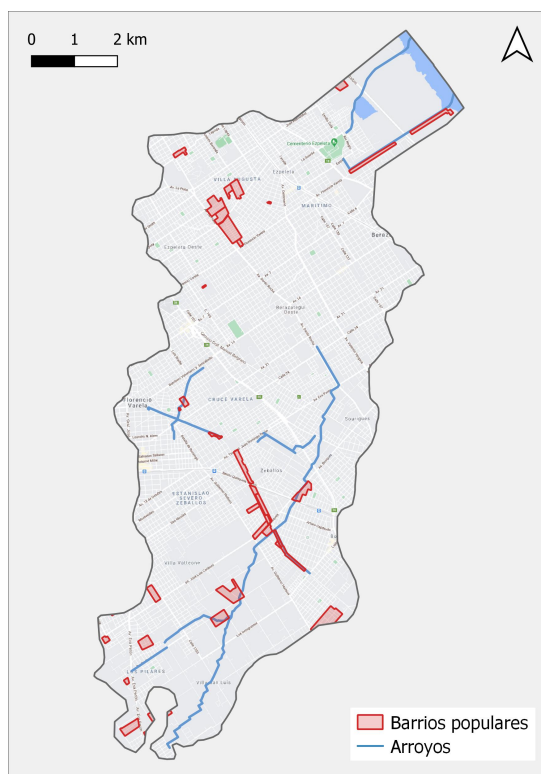


Figura 2.9: Barrios populares. Fuente: RENABAP 2018.

Los barrios populares de esta cuenca en particular, se caracterizan en términos generales por contar con conexiones irregulares a las redes públicas de agua corriente y electricidad, disponer sus efluentes en pozos ciegos y utilizar gas envasado en garrafas. Por otra parte, se observa que varios de ellos se ubican entorno a cursos de agua, lo cual implica una mayor exposición frente a riesgos hídricos.

Para finalizar con la caracterización general, se presentan a continuación fotografías que buscan ejemplificar las tipologías de vivienda predominantes en la cuenca en estudio (Figura 2.10). En su amplia mayoría son casas de una sola planta que se encuentran retiradas de la línea municipal, dando lugar a un patio o jardín delantero y en algunos casos, cuentan a su vez, con un espacio abierto en uno de sus laterales para el estacionamiento de vehículos.



Figura 2.10: Ejemplos representativos de viviendas. Fuente: Google Earth.

## 2.2. Características físicas

En los siguientes apartados se describen la topografía, la estructura de la red de drenaje y la cobertura del suelo de la cuenca. Esta información es fundamental para la implementación del modelo hidrológico-hidráulico.

### 2.2.1. Topografía

Se trabajó con un modelo digital de elevación (MDE) aerofotogramétrico de 5 m de resolución espacial y precisión vertical submétrica, brindado por el servicio de mapas web<sup>1</sup> del Instituto Geográfico Nacional (IGN) (Figura 2.11).

<sup>1</sup><https://www.ign.gob.ar/NuestrasActividades/Geodesia/ModeloDigitalElevaciones/Mapa>



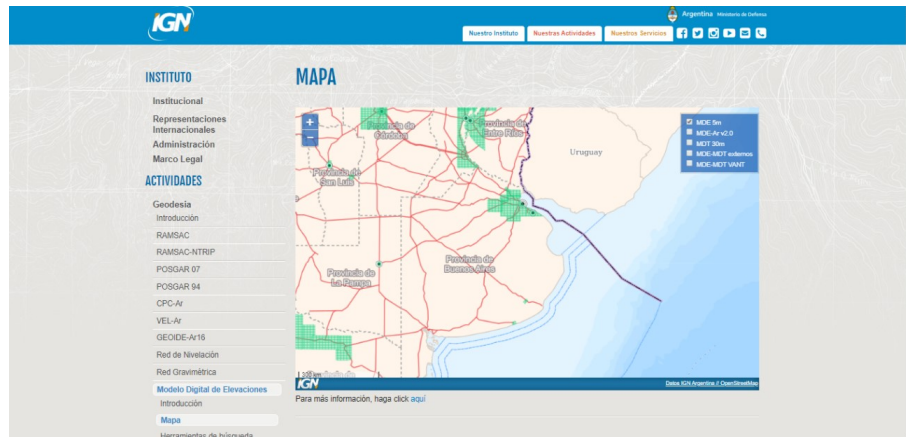


Figura 2.11: Mapa de cobertura de los distintos MDE que ofrece el IGN.

El modelo digital de terreno (MDT) se obtuvo a partir del procesamiento del MDE. Para ello se trazaron curvas de nivel sobre el MDE siguiendo las cotas situadas a nivel de terreno (sobre las calles), suprimiendo así las elevaciones por la presencia de edificaciones y árboles. Una vez obtenidas las curvas, se utilizó la herramienta Topo To Raster, proporcionada por ArcGIS, para generar el ráster del MDT. Este algoritmo de interpolación basado en el software ANUDEM, fue diseñado para generar superficies que mantengan una estructura de drenaje conectada [Hutchinson et al., 2011]. Asimismo, se obtuvo el mapa de pendientes de la cuenca con la función Slope de ArcGIS.

En la Figura 2.12 se presenta el MDT generado dentro de los límites de la cuenca, los cuales fueron redefinidos a partir del mismo siguiendo la línea divisoria de aguas. La diferencia de cotas entre las zonas más altas y más bajas alcanza los 23 m. Se observa que a lo largo de la línea de costa yace la planicie costera del Río de la Plata de aproximadamente 2 km de ancho, donde la cota IGN del terreno se mantiene entre 1,5 y 3,5 m. La pendiente media de la cuenca es 0,13 %.

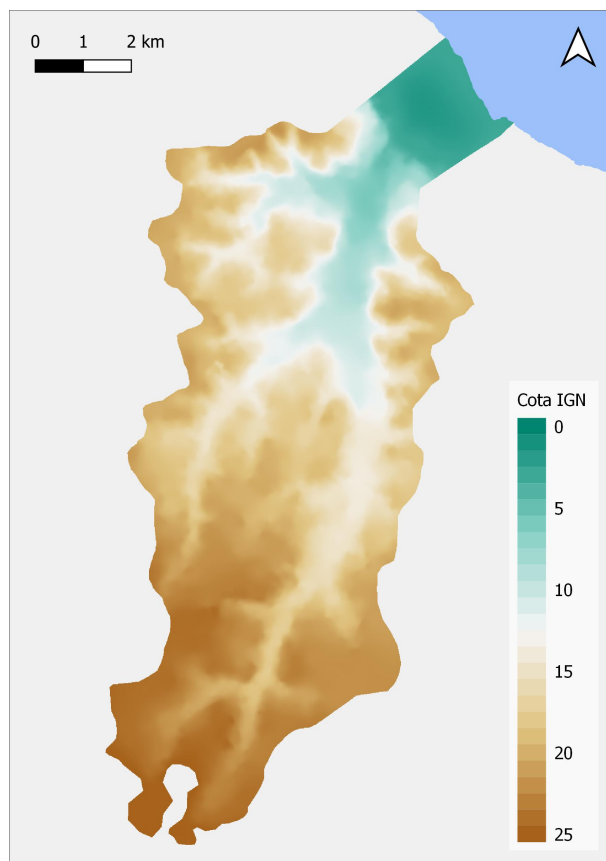


Figura 2.12: Modelo digital del terreno.

### 2.2.2. Red de drenaje

La red de drenaje de la cuenca está compuesta por los arroyos San Juan y Jiménez, el sistema de conductos pluviales y las calles (Figura 2.13).

#### Arroyos

Los arroyos San Juan y Jiménez, entubados en gran parte de su longitud, conducen sus aguas hacia el Río de la Plata.

Los dos principales afluentes del arroyo San Juan nacen en Villa Vatteone y Villa San Luis. En su tramo a cielo abierto el arroyo recorre también las localidades de Bosques, Zaballos y Sourigues. Una vez atravesado el límite con Berazategui, escurre canalizado y rectificado a lo largo de 1 km. Por último, en su tramo final hasta la confluencia con el arroyo Jiménez se encuentra entubado.

Por su parte el arroyo Jiménez se encuentra entubado en sus nacientes en Villa Vatteone y luego escurre a cielo abierto (Figura 2.14) dentro del municipio de Florencio Varela. Metros antes de abandonar el partido homónimo, inicia su tramo entubado y permenace en esa condición a lo largo de todo su recorrido por Berazategui, tanto aguas arriba como aguas abajo de la confluencia con el arroyo San Juan. Pocos metros después de ingresar a la localidad de Ezpeleta, el entubamiento llega a su fin y parte de sus aguas son derivadas hacia un canal aliviador. Tanto el arroyo como el aliviador atraviesan la planicie costera y desembocan en el Río de la Plata.

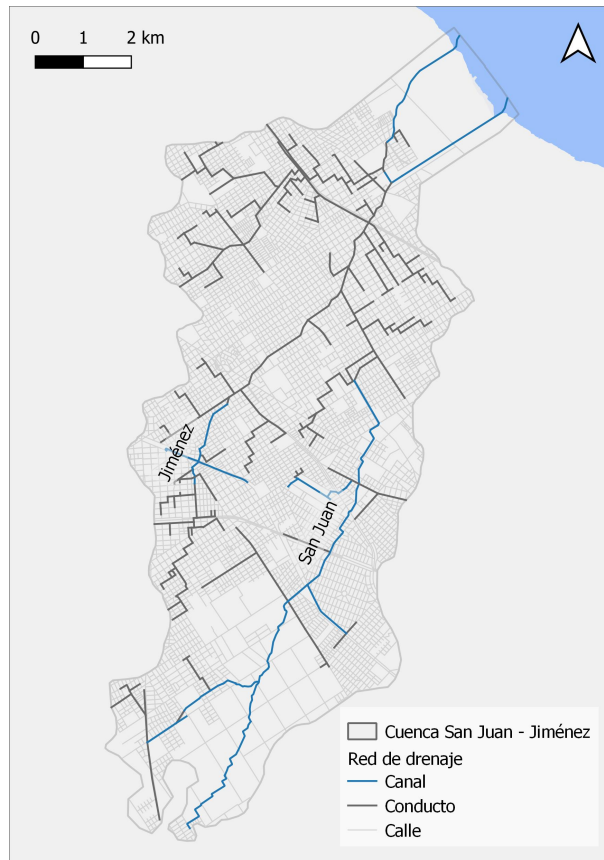


Figura 2.13: Red de drenaje.

Para caracterizar su geometría se acudió a distintas fuentes de información. En el caso de los tramos entubados, tanto el desarrollo en planta como la forma y dimensiones de las secciones transversales, fueron provistos principalmente por documentación otorgada desde la provincia y los municipios que forman parte de la cuenca. En cambio, para el caso de los tramos a cielo abierto, la planimetría se identificó con la ayuda de imágenes satelitales proporcionadas por Google Earth. El mayor desafío fue caracterizar la sección transversal en estos tramos. Para ello se recurrió a la herramienta Street View que ofrece Google. En distintos puntos a lo largo del cauce de los arroyos, se estimaron las dimensiones de la sección a partir de la comparación con otros objetos presentes en la imagen de dimensiones aproximadas conocidas.



Figura 2.14: Arroyo Jiménez. Foto: INA.

### Conductos pluviales

En su mayoría, la información acerca de la planimetría y de las secciones transversales del sistema de conductos pluviales se encontraba disponible en documentación provista en diferentes formatos, por los municipios de Quilmes y Florencio Varela y, en el caso de Berazategui, por la Dirección Provincial de Hidráulica (DPH). En algunas zonas además se procedió a identificar la ubicación de sumideros (bocas de tormenta), “recorriendo” las calles con Street View para luego inferir la traza de conductos menores de la red pluvial. En la Figura 2.15 se muestra un ejemplo, donde se pueden identificar claramente dos sumideros.

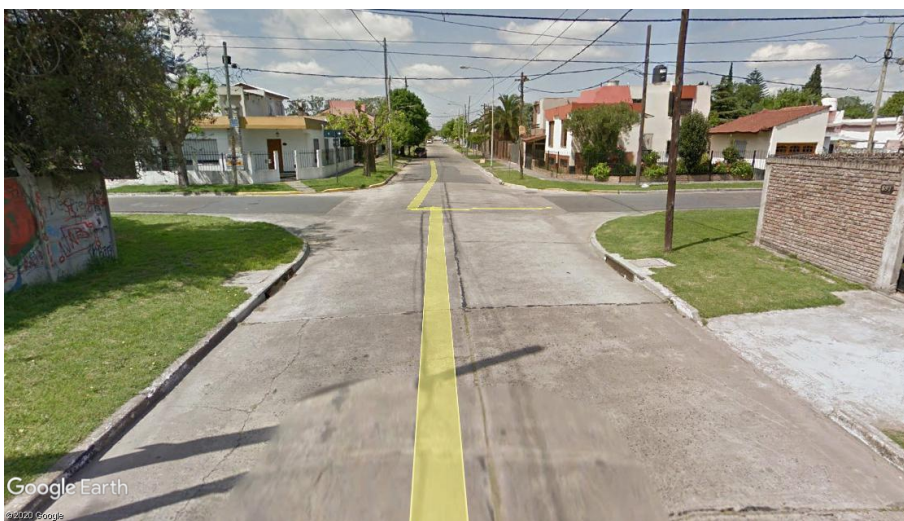


Figura 2.15: Imagen obtenida con Street View (Intersección Calle 9 y Calle 140, Berazategui).



## Calles

Los datos georreferenciados de la red vial se obtuvieron por medio del servicio de cartografía digital disponible en la página web<sup>2</sup> de la Dirección Provincial de Estadística (DPE) del Ministerio de Hacienda y Finanzas de la provincia de Buenos Aires. Este dataset informa para cada calle un ancho de referencia pero no distingue si las mismas se encuentran o no pavimentadas.

### 2.2.3. Cobertura del suelo

Conocer la cobertura del suelo resulta fundamental, ya que su permeabilidad incide en la capacidad del suelo de infiltrar parte del volumen precipitado. La cuenca San Juan – Jiménez es esencialmente urbana. Posee una zona rural en la cuenca alta y una zona no urbanizada en la ribera del Río de la Plata. Este segundo sector ha experimentado un fuerte crecimiento poblacional en las últimas décadas. En la Figura 2.16 se presentan imágenes satelitales tomadas con 35 años de diferencia (1984 - 2019). En ellas se observa que no solo los límites de la mancha urbana se han extendido, sino que también dentro de la misma se han intensificado la urbanización y la consecuente impermeabilización del suelo. En la actualidad, el área urbanizada representa aproximadamente el 70 % del área total de la cuenca.



Figura 2.16: Avance de la mancha urbana. Fuente: Google Earth.

Para obtener un primer ráster que dividiese la cuenca en zonas según se encuentren urbanizadas o no, se utilizó Google Earth Engine (GEE). Esta plataforma no sólo pone a disposición una gran cantidad de imágenes satelitales históricas y actuales, sino que también proporciona APIs para el análisis y procesamiento de grandes conjuntos de datos geoespaciales. El método que se empleó fue el de clasificación supervisada. El mismo consiste en identificar sobre la imagen satelital series de “puntos de entrenamiento” representativas de cada clase. Luego mediante un algoritmo se clasifica cada píxel del ráster por similitud de su firma espectral con la de los puntos de entrenamiento. Las clases en que se dividió el ráster de la zona fueron: cobertura urbana, cobertura vegetal y agua. Se trabajó a partir de imágenes Landsat 5 y Landsat 8 y el algoritmo de clasificación CART (Classification And Regression Tree). A su vez, dentro del área urbanizada se distinguieron tres zonas, cada una con un grado distinto de permeabilidad. Para caracterizar cada zona se seleccionó un conjunto de seis manzanas representativas y se determinó

<sup>2</sup><http://www.estadistica.ec.gba.gov.ar/dpe/index.php/territorio/cartografia-digital>

el porcentaje de área impermeable a partir de la observación de imágenes satelitales (ver ejemplo en Figura 2.17). En la Tabla 2.2 se informan los porcentajes de impermeabilidad correspondientes a cada zona obtenidos de esa manera.

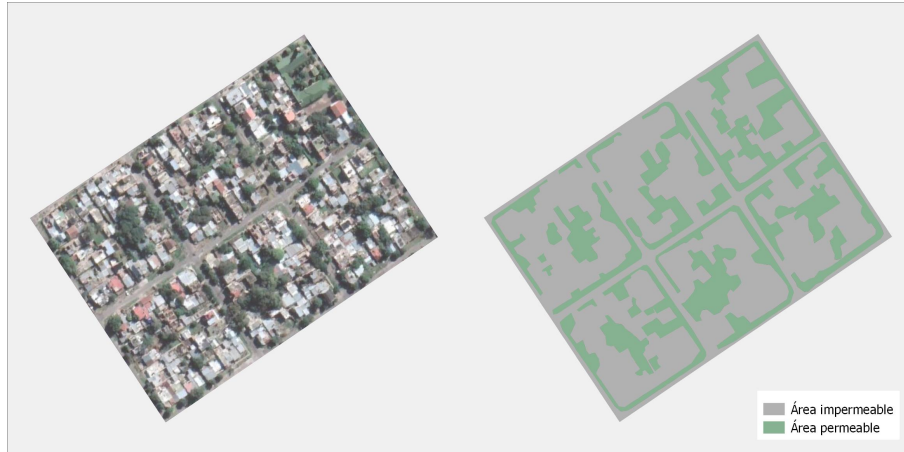


Figura 2.17: Clasificación de cobertura de suelo en seis manzanas representativas de la zona urbanizada 2.

| Zona              | % impermeabilidad |
|-------------------|-------------------|
| Zona urbanizada 1 | 72 %              |
| Zona urbanizada 2 | 68 %              |
| Zona urbanizada 3 | 58 %              |

Tabla 2.2: Porcentaje de impermeabilidad correspondiente a cada zona.

En la Figura 2.18 se muestra el ráster resultante de la clasificación supervisada en GEE y la posterior subdivisión del área urbanizada en zonas de distinto grado de impermeabilidad.

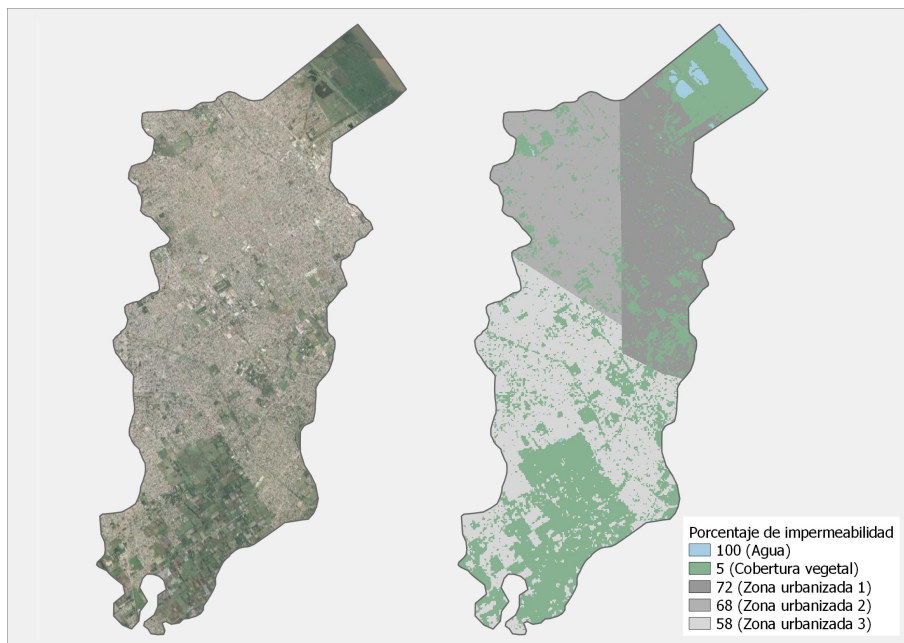


Figura 2.18: Imágen satelital actual y ráster de impermeabilidad.

## 2.3. Problemática

En la siguiente sección se presentan los estudios realizados con anterioridad sobre la situación del sistema de drenaje de la cuenca y luego se incluye una breve descripción de la problemática asociada.

### 2.3.1. Antecedentes

Se cuenta con un informe producido por la Secretaría de Obras y Servicios Públicos del municipio de Florencio Varela titulado *“Análisis de problemáticas y proyectos hidráulicos resolutivos del partido”* donde se realiza un diagnóstico de cada una de las cuencas que se encuentran parcialmente dentro de los límites del partido. Este documento incluye una breve descripción de cada uno de los tramos de arroyos que atraviesan la zona (longitud, condición a cielo abierto o entubado, barrios que atraviesa, sectores de difícil limpieza, etc.) los cuales son ilustrados mediante fotografías. Incorpora además planos en donde se indican las trazas de los arroyos y los conductos existentes, los proyectos hidráulicos a futuro y las zonas con problemas hidráulicos. Por último también presenta en formato de fichas la información asociada a cada una de las obras hidráulicas proyectadas.

El otro antecedente disponible se trata del documento *“Estudio de inundabilidad en el Gran Buenos Aires - Informe de diagnóstico de las cuencas de los arroyos Luján, Sarandí, Santo Domingo, Jiménez y Las Conchitas”* elaborado por el LHA-INA [INA, 2013]. Este informe surge de la necesidad de evaluar la vulnerabilidad en diferentes cuencas a partir del evento de abril de 2013 que produjo una gran inundación en la ciudad de La Plata. Para ello se generaron mapas de manchas de inundación, velocidades máximas y vulnerabilidad dinámica (producto de la velocidad por la altura líquida), asociados a la simulación de ese mismo evento de precipitación sobre cada una de las cuenca analizadas.

### 2.3.2. Descripción de la problemática

Las limitaciones del sistema de drenaje quedan evidenciadas a través de los diferentes impactos que van a depender de las características del evento de precipitación y de la zona afectada. Si bien en los

últimos años no se han registrado inundaciones severas en la cuenca, son frecuentes los anegamientos en distintos sectores por insuficiencia en la capacidad de drenaje. Los anegamientos ocurren tanto en el ámbito urbano como en el rural afectando el normal funcionamiento de las actividades de la sociedad (Figura 2.19). Interrumpen en mayor o menor medida el tránsito de vehículos y peatones (Figuras 2.20 y 2.21), en algunos casos impidiendo el acceso a centros educativos y de salud (Figura 2.22).

En algunos eventos el nivel de agua es tal que ingresa en las viviendas, ya sea como consecuencia de anegamientos del sistema de desagües pluviales o debido al desborde de arroyos cercanos. Estos episodios provocan daño en las viviendas, deterioro de mobiliario, pérdida de bienes y pertenencias, pérdida de jornadas de trabajo y de clases, además de favorecer la propagación de enfermedades hídricas y poner en riesgo la vida de las personas por peligro de electrocución.



Figura 2.19: Av. Calchaquí y av. Bosques, febrero 2013. Fuente: YouTube “El Radar del Sur”.





Figura 2.20: Paso bajo nivel Hernández-Smith inundado, Ezpeleta. Fuente: YouTube.

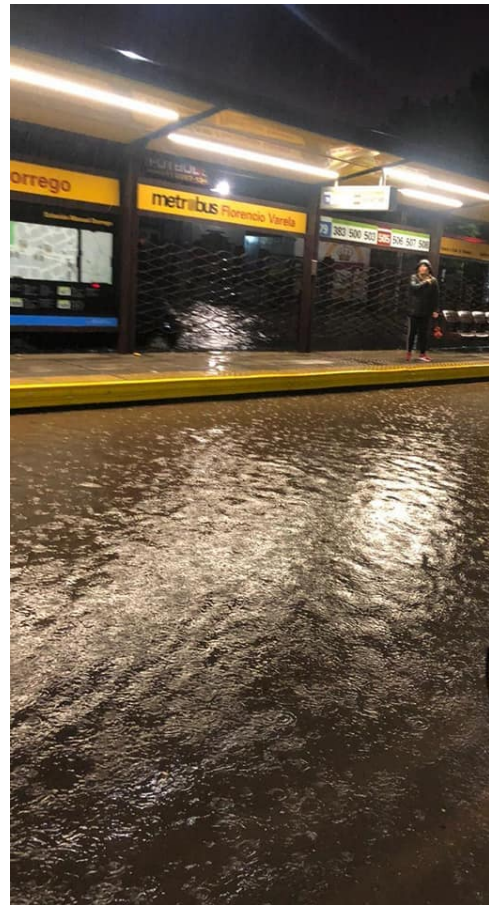


Figura 2.21: Metrobus de Florencio Varela inundado. Fuente: Facebook “Vecinos Varelesenses”.



Figura 2.22: Anegamiento en acceso a escuela. Fuente: Facebook “Vecinos Varelesenses”.

## Capítulo 3

# Metodología

El análisis del comportamiento de la cuenca se realizó a partir de la modelación hidrológico-hidráulica mediante el software Storm Water Management Model (SWMM) proporcionado por la Agencia de Protección Ambiental de Estados Unidos (EPA). Para generar el modelo de la cuenca se utilizaron principalmente las siguientes dos herramientas:

QGIS Sistema de Información Geográfica (SIG)

ConuPy Software desarrollado por el INA. Consiste en una colección de rutinas que permiten captar información geográfica y armar la red de subcuencas, nodos y conexiones del modelo SWMM.

La recolección, procesamiento y producción de información georreferenciada se realizó a través de QGIS, mientras que la generación del modelo SWMM a partir de esa información fue posible gracias a ConuPy<sup>1</sup>. El postprocesamiento de los resultados de la modelación se realizó mediante las facilidades y librerías que ofrece el lenguaje de programación Python. Especialmente las librerías `swmmout`<sup>2</sup> y `swmmtoolbox`<sup>3</sup> resultaron fundamentales en esta etapa, ya que brindan agilidad al permitir acceder a la información contenida en los archivos de salida de la modelación sin necesidad de utilizar la interfaz gráfica que proporciona SWMM. Cabe destacar que tanto SWMM, como QGIS y ConuPy son softwares libres y de código abierto. La calibración y la validación del modelo se realizaron por medio de la simulación de una serie de eventos de tormenta ocurridos durante el transcurso del año 2019. Para ello se contó con los registros de precipitación de doce pluviómetros ubicados dentro y en las cercanías de la cuenca y un sensor de nivel instalado en el arroyo San Juan.

### 3.1. Implementación del modelo

#### 3.1.1. Modelo EPA-SWMM

Para el desarrollo de este estudio se trabajó con una versión modificada del modelo EPA-SWMM v5.11 desarrollada por el INA. Esta versión mejora la discretización de las secciones transversales para reducir los errores de conservación de masa [Re et al., 2019].

El EPA-SWMM es un modelo dinámico de simulación de lluvia-escorrentía, utilizado para realizar simulaciones de un único evento o continuas, calculando la cantidad y la calidad de escorrentía, principalmente en cuencas urbanas [Rossman and Huber, 2017].

---

<sup>1</sup> disponible en <http://gitlab.com/nicolas-d-badano/conupy>

<sup>2</sup> documentación disponible en <https://swmmout.readthedocs.io>

<sup>3</sup> disponible en <https://github.com/timcera/swmmtoolbox>

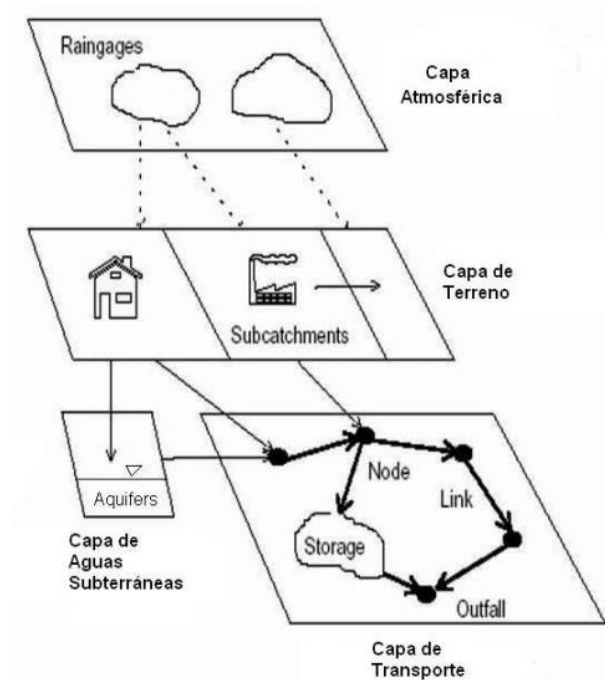


Figura 3.1: Capas del modelo EPA-SWMM. [Gomez, 2007]

En la Figura 3.1 se presenta un esquema de las capas interrelacionadas en las cuales SWMM discretiza el sistema. Las cuatro capas que se muestran son las siguientes:

- Capa atmosférica: en ella se genera la precipitación.
- Capa de terreno: recibe precipitación de la capa atmosférica. Allí se modelan los procesos de evaporación, infiltración y generación de escorrentía.
- Capa de aguas subterráneas: recibe la porción infiltrada y transfiere parte de la misma a la capa de transporte como flujo subterráneo.
- Capa de transporte: constituida por una red de nodos y conexiones que transportan el agua hasta los puntos de salida del sistema.

En la modelación de la cuenca en estudio, la capa de transporte es representada mediante dos subcapas. De esta manera se busca representar el sistema dual de drenaje, considerando por un lado, las conducciones enterradas (canales y conductos) y por otro, las conducciones en superficie (calles y avenidas). Ambas subcapas se conectan por medio de orificios y vertederos. Por otra parte, la capa de aguas subterráneas no es modelada.

EPA-SWMM cuenta con cinco módulos que se encargan de representar los distintos procesos hidráulicos e hidrológicos:

- Transformación lluvia-escorrentía
- Modelo de transporte (Flow routing)
- Derretimiento de nieve
- Aguas subterráneas
- Calidad de agua

En este trabajo sólo se utilizan los dos primeros módulos del listado anterior.

### 3.1.1.1. Módulo hidrológico: Transformación lluvia-escorrentía

Al ser SWMM un modelo semidistribuido, puede representarse mediante la subdivisión en subcuencas, la variabilidad espacial de las características en toda la cuenca. En cada una de las subcuencas, lo suficientemente pequeñas para que sus parámetros sean representativos de toda el área que encierran, se modela la transformación lluvia-escorrentía.

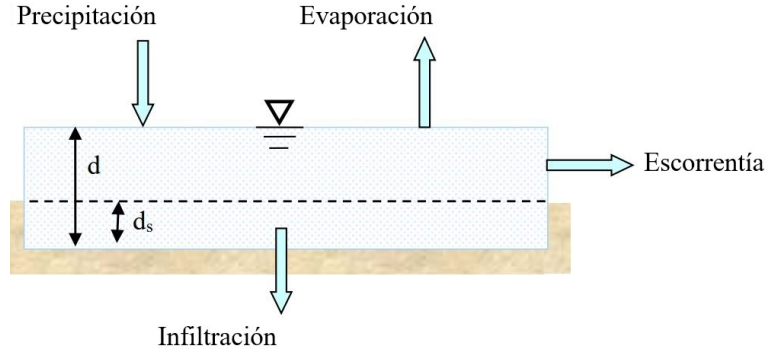


Figura 3.2: Esquema de modelación de subcuenca como depósito no lineal. [Rossman and Huber, 2016]

El módulo de transformación lluvia-escorrentía se centra en la resolución de la siguiente ecuación de continuidad, basada en la esquematización de cada subcuenca como un depósito no lineal (Figura 3.2):

$$\frac{\partial d}{\partial t} = i - e - f - q \quad (3.1)$$

Donde:

- $d$  : nivel de agua en el depósito
- $t$  : tiempo
- $i$  : intensidad de precipitación
- $e$  : tasa de evaporación
- $f$  : tasa de infiltración
- $q$  : escorrentía por unidad de área

Realizando un breve análisis de la ecuación anterior término por término:

- La intensidad de precipitación es un dato de entrada del modelo.
- En la simulación de eventos la evaporación puede ser obviada ya que, durante el desarrollo de las tormentas, las condiciones atmosféricas imposibilitan tal proceso.
- En cuanto a la infiltración, SWMM permite elegir entre cuatro métodos de modelación: método de Horton, método de Horton modificado, método de Green-Ampt o método de curva número.
- La escorrentía se estima asimilando la superficie de la subcuenca a un canal rectangular en régimen uniforme de altura  $d - d_s$  (siendo  $d_s$  el almacenamiento en depresión), para, de esa forma, calcular el caudal por unidad de área aplicando la fórmula desarrollada por Chezy-Manning. Cuando  $d$  es menor que  $d_s$ ,  $q$  es igual a cero.

Por otra parte, cada subcuenca puede estar subdividida según su porcentaje de impermeabilidad en dos partes: una permeable y otra impermeable. En esos casos la ecuación 3.1 se evalúa en cada subárea

por separado para luego obtener la escorrentía total generada en la subcuenca.

SWMM permite además rutear el flujo dentro de cada subcuenca desde la subárea impermeable hacia la subárea permeable o viceversa. El flujo recibido por la subárea aguas abajo es distribuido uniformemente sobre su superficie, de la misma manera que se distribuye el volumen precipitado.

En este modelo se consideró el ruteo desde áreas impermeables hacia áreas permeables. De esta forma se divide cada subárea impermeable en dos: la subárea impermeable efectiva y la subárea impermeable no conectada directamente a la red de drenaje. Esta última busca representar la porción impermeable que drena hacia una superficie permeable, como puede ser un techo que desagua en un jardín.

### 3.1.1.2. Módulo hidráulico: Modelo de transporte (Flow routing)

El módulo de transporte de SWMM cuenta con tres métodos distintos para la obtención de caudales y niveles en los distintos elementos de la red. Los métodos de onda dinámica y onda cinemática resuelven las ecuaciones de Saint Venant de forma completa y simplificada respectivamente. Un tercer método resulta de asumir en cada paso temporal de cálculo que el flujo es uniforme y permanente [Rossman and Huber, 2017]. Esta última opción únicamente es apropiada para realizar análisis de carácter preliminar. En cualquiera de los casos, se trata de un análisis unidimensional.

Se decidió trabajar con el método de onda dinámica porque es el único que permite, a costas de un mayor esfuerzo computacional, representar fenómenos tales como los efectos de remanso y la presurización del flujo [Rossman and Huber, 2017].

En cuanto a la representación de la red de drenaje dual se trabajó como se mencionó anteriormente con dos subcapas. La subcapa superficial está compuesta por calles representadas como canales que se unen mediante nodos de almacenamiento, mientras que la subcapa enterrada incluye conductos, canales y arroyos conectados entre sí por medio de nodos de unión. La conexión entre subcapas se materializa a través de sumideros (uniones calle-conducto) y vertederos (uniones calle-canal).

### 3.1.2. Generación del modelo

ConuPy es una herramienta de preprocesamiento y posprocesamiento de código abierto desarrollada por el INA, que consiste en una colección de funciones de Python que transforma datos georreferenciados desde un entorno GIS y automáticamente construye el esquema discreto para la modelación en EPA-SWMM [Re et al., 2019]. Puede ser instalada como un complemento en versiones de la serie 2 de QGIS.

Los datos de entrada requeridos para generar el modelo SWMM se presentan en la Tabla 3.1.

| Dato                | Formato            |
|---------------------|--------------------|
| Red de drenaje      | Shape de líneas    |
| Calles              | Shape de líneas    |
| Cuenca              | Shape de polígonos |
| Nodos de borde      | Shape de puntos    |
| MDT                 | Ráster             |
| Pendientes          | Ráster             |
| Impermeabilidad     | Ráster             |
| Serie de estaciones | Archivo de texto   |

Tabla 3.1: Datos de entrada de ConuPy.

Los datos y la forma en que se obtuvo cada uno de ellos se detalla en el Capítulo 2, salvo el último ítem de la tabla, el cual se estudiará más adelante en el apartado 3.3.1.3.

El uso de esta herramienta fue fundamental para poder generar un modelo de alta resolución. El modelo resultante está compuesto por el siguiente número de elementos (Tabla 3.2):

| Elemento                | Cantidad |
|-------------------------|----------|
| Subcuencas              | 18359    |
| Nodos de unión          | 2033     |
| Nodos de almacenamiento | 17866    |
| Conducciones            | 24194    |
| Orificios               | 2085     |
| Vertederos              | 263      |
| Nodos de salida         | 2        |

Tabla 3.2: Número de elementos del modelo.

### 3.1.3. Caracterización de los elementos del modelo

La Figura 3.3 es una representación esquemática de los distintos elementos que componen el modelo. Cada una de las subcuencas recibe la precipitación asociada a un pluviómetro determinado. La escorrentía que en ellas se genera se dirige a los nodos de almacenamiento que son conectados por tramos de calle. Por medio de orificios y vertederos se conecta la capa superficial del sistema dual de drenaje a la capa inferior, la cual está compuesta por conductos pluviales, canales y arroyos. En los apartados siguientes se detallan las características de cada tipo de elemento.



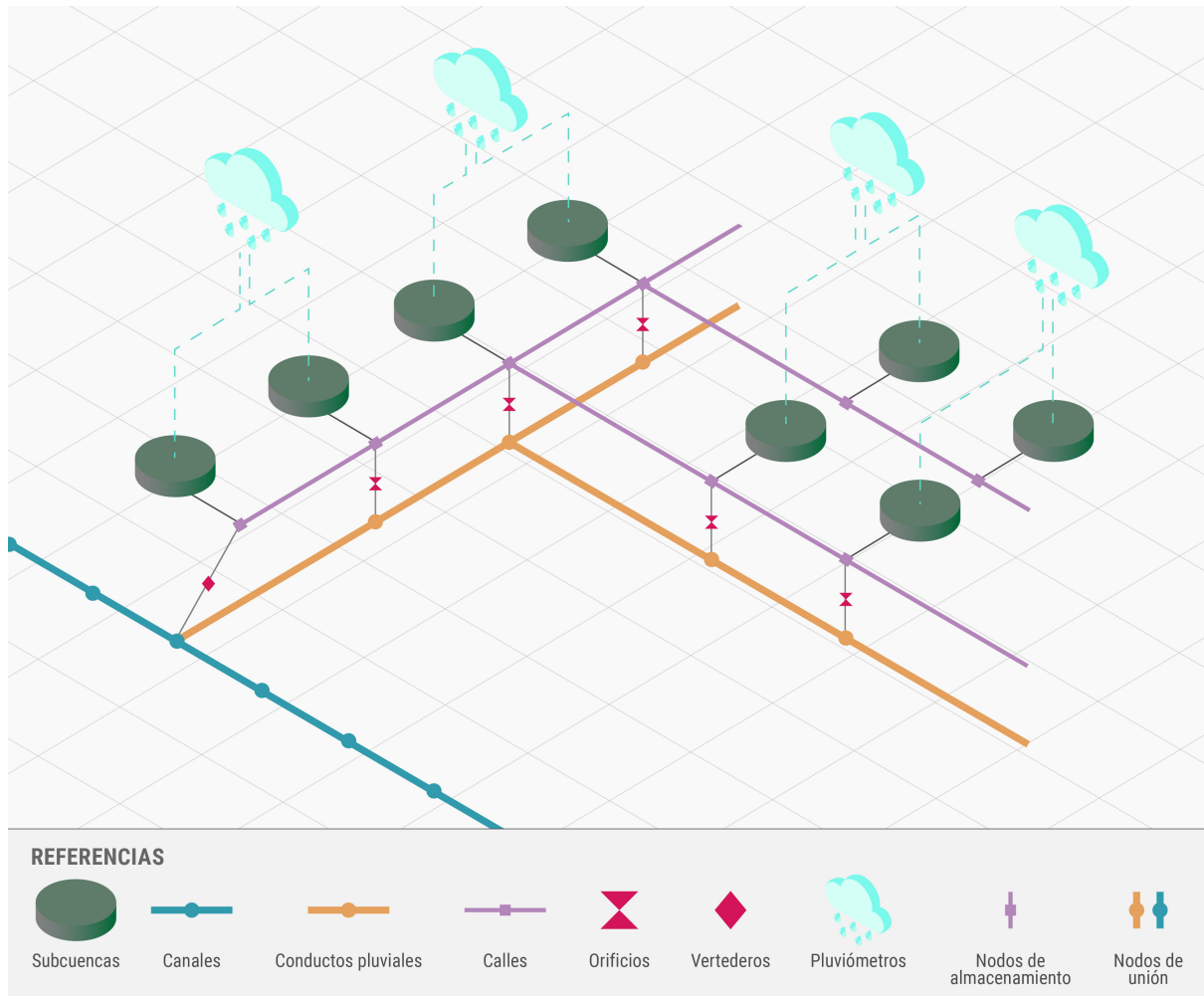


Figura 3.3: Representación esquemática de los elementos que componen el modelo.

### 3.1.3.1. Subcuencas

**Geometría** ConuPy define los límites entre subcuencas trazando polígonos de Thiessen centrados en los nodos superficiales del modelo (Figura 3.4). El área promedio de las subcuencas es de 0,4 ha. La pendiente de cada subcuenca se obtiene muestreando el mapa de pendientes en su nodo central.

**Porcentaje de impermeabilidad** Al igual que la pendiente, la impermeabilidad de cada subcuenca se determina como el valor muestreado en su nodo central sobre el mapa correspondiente. En el apartado 2.2.3 se presenta el ráster de impermeabilidad y se detalla el procedimiento realizado para obtenerlo.

**Características de las subáreas** Las subcuencas se dividen en dos subáreas: una permeable y una impermeable. Estas subáreas se caracterizan por su rugosidad (coeficiente de Manning) y su profundidad de almacenamiento en depresión  $d_s$  (ver apartado 3.1.1.1). Los valores de estos parámetros (Tabla 3.3) fueron tomados de la modelación de la cuenca del arroyo Dupuy [Re et al., 2019]. La misma se encuentra a unos 30 km de la cuenca en estudio, en la localidad de Laferrere en el partido de La Matanza. Ambas cuencas presentan similares características de urbanización.



Figura 3.4: Imágen satelital (izq., Fuente: Google Earth) y esquema del modelo SWMM (der.). Límites entre subcuencas en negro, nodos de almacenamiento en celeste, calles en amarillo y conductos y nodos de unión en naranja.

| Parámetro                                  | Subárea   |             |
|--------------------------------------------|-----------|-------------|
|                                            | Permeable | Impermeable |
| Profundidad de almacenamiento en depresión | 2 mm      | 1 mm        |
| Rugosidad (coeficiente de Manning)         | 0.050     | 0.025       |

Tabla 3.3: Parámetros de las subáreas.

**Ruteo entre subáreas** Se consideró el ruteo dentro de cada subcuenca entre una porción de la subárea impermeable hacia la subárea permeable. El porcentaje de ruteo entre subáreas es una de las variables con mayor incertidumbre y tiene un impacto significativo en los resultados de la simulación. Es por ello que se decidió elegir el porcentaje de ruteo en subcuencas impermeables, como una de las variables de calibración del modelo. En el caso de las subcuencas permeables, donde la incidencia de este parámetro en la modelación es menor, se optó por estimarlo a partir de las expresiones propuestas por Sutherland (Ec. 3.2) recomendadas en el manual de referencia de SWMM [Rossman and Huber, 2016].

$$EIA = aTIA^b \quad (3.2)$$

Donde:

$EIA$  : área impermeable efectiva

$TIA$  : área impermeable total

$a, b$  : coeficientes fijados para cuencas con distintos grados de conexión a la red de drenaje.

Considerando en esas subcuencas un porcentaje de impermeabilidad igual al 5 % y adoptando los coeficientes dados para cuencas altamente desconectadas ( $a = 0,01$  y  $b = 2,00$ ), el porcentaje de ruteo resulta 95 %.

**Parámetros de infiltración** Se decidió trabajar con el modelo de Green-Ampt por tener mayor sustento físico que el modelo de Horton. Gran parte de la cuenca, y en especial la cuenca alta (principal zona permeable de la cuenca) se extiende sobre una planicie loessica donde los suelos son principalmente franco limosos y franco arcillosos [Pereyra, 2004]. Por otro lado se contó con estudios de suelos de un hospital de la zona, donde los estratos superficiales son identificados como limos de baja plasticidad (ML).

Rawls *et al.* (1983) presentan valores de referencia de los parámetros de Green Ampt para distintos tipos de suelo obtenidos a partir del análisis de 5000 horizontes de suelo. Se adoptó para la modelación del proceso de infiltración, el conjunto de parámetros correspondiente a suelos franco limosos (Tabla 3.4).

| Parámetro                | Valor    |
|--------------------------|----------|
| Conductividad hidráulica | 6,5 mm/h |
| Succión capilar          | 167 mm   |
| Porosidad efectiva       | 0,49     |

Tabla 3.4: Parámetros de infiltración de Greem-Ampt.

### 3.1.3.2. Conducciones

**Geometría** La forma en la que se obtuvo la información acerca de la geometría de las conducciones (calles, conductos, canales y arroyos) se detalla en la sección 2.2.2. Cada tramo se caracteriza por su longitud, la elevación de los extremos aguas arriba y aguas abajo y por su sección transversal. A continuación se muestra a modo de ejemplo la sección transversal adoptada para una calle del modelo (Figura 3.5).

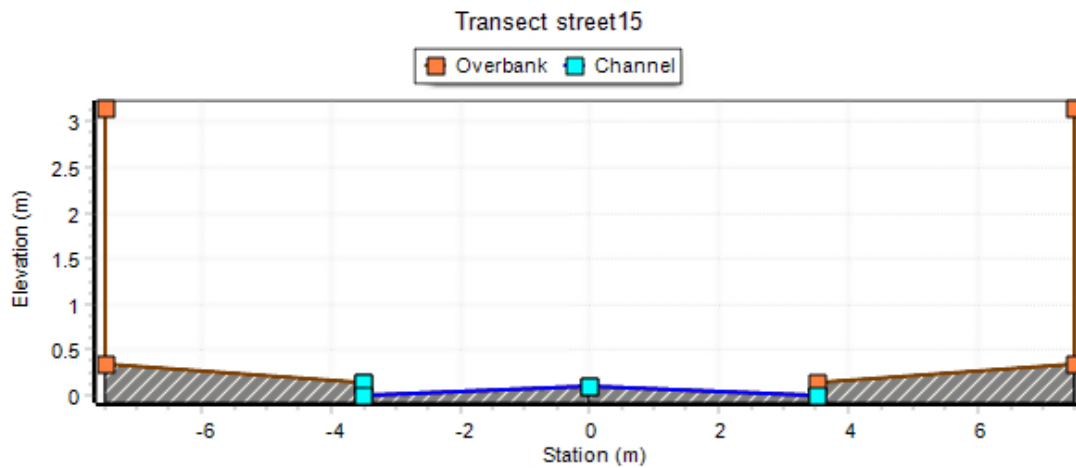


Figura 3.5: Ejemplo de sección transversal adoptada para calles.

**Rugosidad** En principio se adoptaron los siguientes valores de rugosidad:

| Tipo de conducción | Coefficiente de Manning |
|--------------------|-------------------------|
| Conductos          | 0,020                   |
| Calles             | 0,025                   |
| Canales            | 0,040                   |

Tabla 3.5: Valores de rugosidad adoptados.

Para su determinación fueron consultadas diversas fuentes entre las que se incluyen las recomendaciones del manual de usuario de SWMM [Rossman, 2015], los valores adoptados en la modelación de la cuenca del arroyo Dupuy [Re et al., 2019] y las tablas presentadas en el libro *Hidráulica de canales abiertos* [Chow, 1994]. Además se tuvieron en cuenta las siguientes consideraciones: por un lado, que los valores adoptados no correspondan a una situación de diseño, sino que representen las condiciones actuales de la red de drenaje, y por el otro, que el coeficiente de rugosidad de calles sea representativo de la red vial de la cuenca, la cual está compuesta tanto por calles pavimentadas como por calles de tierra.

### 3.1.3.3. Orificios

**Geometría** La geometría está dada por la de un sumidero estándar de 2 m de longitud y 0,15 m de altura de abertura.

**Coefficiente de descarga** El coeficiente para orificios rectangulares perfectos fue determinado analíticamente por Boussinesq y es igual a  $\pi/5$ , es decir 0,628, si además se aplica la corrección propuesta por Bidone para considerar la contracción parcialmente suprimida, resulta un coeficiente igual a 0,67 [Dalmati, 1962]. Para tener en cuenta la pérdida de la capacidad de erogación por la presencia de basura, se decidió reducir el coeficiente a considerar, por lo que se adoptó un coeficiente igual a 0,60.

### 3.1.3.4. Vertederos

**Geometría** Las conexiones entre calles y canales se modelaron como vertederos rectangulares de 20 m de ancho.

**Coefficiente de descarga** Brunner (2014) sugiere un rango de 1,5 a 2,6  $\text{ft}^{1/2}\text{s}^{-1}$  para vertederos que modelan carreteras a lo largo de canales naturales, estableciendo 2,0  $\text{ft}^{1/2}\text{s}^{-1}$  como el valor por defecto. Se adopta este último valor, el cual expresado en unidades del Sistema Internacional es igual a 1,1  $\text{m}^{1/2}\text{s}^{-1}$ .

### 3.1.3.5. Nodos de almacenamiento

**Curva de almacenamiento** Los nodos de almacenamiento se encuentran caracterizados por una curva área-altura que permite calcular el volumen almacenado asociado a un determinado tirante. En este modelo, los nodos de almacenamiento conectan tramos de calle y representan el volumen líquido que es almacenado en las manzanas cuando el agua alcanza cierto nivel. Para definir la forma de una curva tipo se obtuvieron las curvas hipsométricas asociadas a ocho manzanas aleatorias representativas de la cuenca. A partir de las mismas se trazó una curva aproximada compuesta por tres rectas (Figura 3.6). La primera recta representa los momentos iniciales en que se produce un anegamiento. El agua cubre la calle, luego las veredas y a continuación comienza a ingresar a los domicilios, inundando la porción de la manzana sin edificar, que incluye jardines, patios y estacionamientos. En esta etapa, pequeñas variaciones en el nivel significan un importante aumento o disminución del área inundada. Una vez superado cierto umbral, el avance de la superficie ocupada por el agua se vuelve más lento. El área superficial sigue en aumento hasta que el nivel alcanza los 5 m y cubre la manzana en su totalidad.

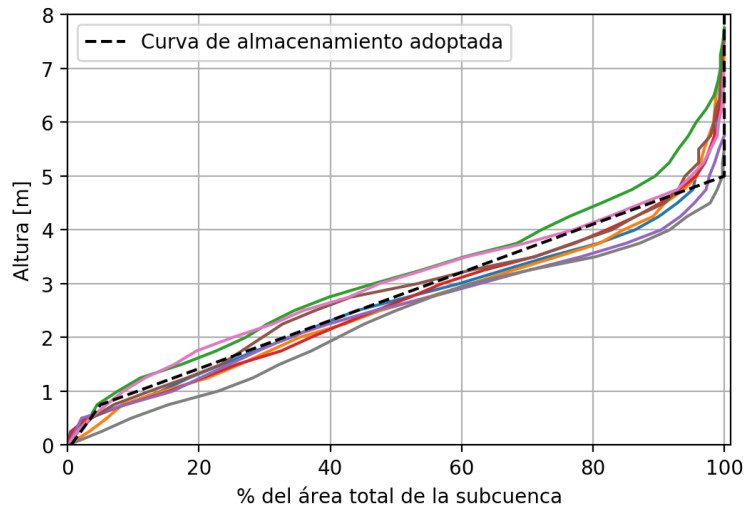


Figura 3.6: Determinación de la curva de almacenamiento.

## 3.2. Análisis de estabilidad

Antes de realizar los ensayos de sensibilidad y proceder con la calibración, fue necesario testear la estabilidad del modelo. En una primera versión del modelo se detectaron importantes problemas de estabilidad, evidenciados por la presencia de oscilaciones y picos pronunciados carentes de sentido físico, en las series temporales de nivel y caudal correspondientes a distintos elementos de la red (ver ejemplo en la Figura 3.7).

En el apartado 3.2.1 se detallan las distintas estrategias de control de inestabilidades que se evaluaron y las que finalmente fueron utilizadas y, en el apartado 3.2.2, se expone el motivo por el cual determinadas oscilaciones persisten luego de las medidas adoptadas.

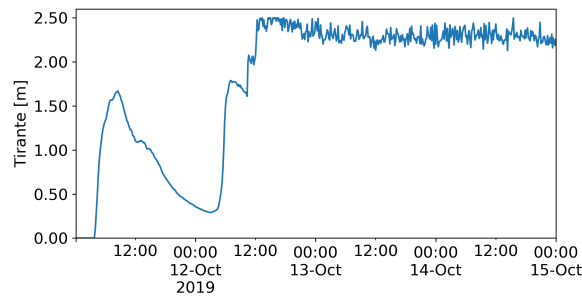


Figura 3.7: Serie temporal de nivel en un conducto que evidencia problemas de estabilidad.

### 3.2.1. Estrategias de control

El manual de usuario de SWMM v5.1 [Rossman, 2015] enumera cuatro alternativas para el control de las inestabilidades en modelos de onda dinámica:

1. Reducir el paso temporal de cálculo  
Es la más básica y ampliamente conocida forma de controlar inestabilidades numéricas.
2. Utilizar la opción de paso variable con un factor de paso temporal menor  
SWMM permite utilizar un paso temporal variable entre umbrales máximos y mínimos. En cada

paso de la simulación, se calcula el paso temporal necesario para cumplir la condición de Courant en la totalidad de las conducciones. En caso de no ser posible, se adopta el valor mínimo establecido.

3. Ignorar los términos inerciales de la ecuación de momento (segunda ecuación de Saint Venant).
4. Utilizar la función *lengthening*  
Este artilugio numérico alarga artificialmente los elementos de conexión para los cuales no es posible cumplir la condición de Courant asociada a un paso temporal especificado (que puede ser o no igual al paso temporal elegido para la simulación). De esta forma se garantiza su cumplimiento en cada uno de los elementos. La rugosidad y la pendiente son ajustadas de modo que la resistencia al flujo del conducto alargado sea equivalente a la que ofrece el conducto original [Rossman and Huber, 2017].

A la hora de obtener los primeros resultados que, como se mencionó anteriormente, presentaban problemas de estabilidad, ya se encontraban activadas las opciones de paso variable, *lengthening* y amortiguación total de términos inerciales. Por esta razón, se decidió seguir adelante con la alternativa 2, volviendo más estricta la condición de Courant. Esta condición establece que la relación entre los pasos de discretización espacial y temporal debe ser mayor que la velocidad de propagación del fenómeno físico modelado. En ese sentido, tramos de conducciones de menor longitud requerirán un paso temporal menor. El factor de paso temporal (número de Courant) que se propone reducir en esta alternativa, es el cociente entre la velocidad física y la velocidad de discretización.

Los resultados de esta medida fueron ampliamente satisfactorios desde el punto de vista del control de inestabilidades (Figura 3.8), pero como desventaja esperable, el tiempo de ejecución del modelo aumentó considerablemente (cerca de un 50 % más).

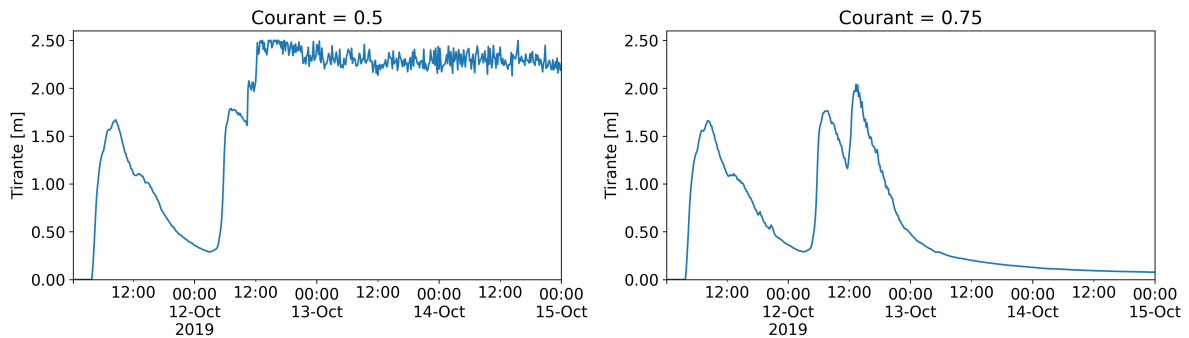


Figura 3.8: Serie temporal de nivel en un conducto con factor de paso temporal igual a 0,50 (izq.) y 0,75 (der.).

Se decidió entonces encarar una optimización de la geometría del modelo para aliviar la exigencia numérica. La misma consistió en la adecuación de los tramos en los cuales se discretizaron las conducciones (canales, calles y conductos) de forma tal que la longitud de cada uno de ellos no fuera en ningún caso menor que 20 m. Se consiguió de esta manera:

- Disminuir los errores de continuidad
- Controlar gran parte de las inestabilidades reflejadas en las series temporales
- Aumentar el paso de cálculo promedio
- Reducir el número de iteraciones promedio en cada paso
- Disminuir el número de conducciones alargadas por la función *lengthening*

Luego de esta mejora en la estabilidad del modelo, se analizó si la contribución de la función de alargamiento artificial era significativa y si, por lo tanto, se justificaba o no utilizarla. Para ello se analizó lo que ocurría en una simulación en particular.

En el caso analizado se observó que de los 4777 elementos que fueron alargados, al desactivar la función solamente uno se volvía crítico (fijaba el paso temporal requerido) durante el 4 % de la simulación. Esto indica que estaban siendo alargadas conducciones para las cuales no resultaba necesario, es decir, elementos que no eran determinantes a la hora de definir el paso de cálculo. Se advirtió además que del total de conducciones alargadas solo cuatro eran conductos, el resto se trataba de calles o canales.

Analizando el procedimiento de cálculo utilizado para la determinación del factor de alargamiento se pudo entender el comportamiento descripto.

Para la determinación de la nueva longitud, se parte de la condición de Courant (Ecuación 3.3).

$$\frac{L}{\Delta t} \geq |\bar{U} + c| \quad (3.3)$$

Donde:

$L$  : longitud del elemento

$\Delta t$  : paso temporal de cálculo

$\bar{U}$  : velocidad media del flujo

$c$  : celeridad de onda que se estima como:

$$c = \sqrt{g\bar{A}/\bar{W}} \quad (3.4)$$

Donde:

$g$  : aceleración de la gravedad

$\bar{A}$  : sección transversal media del flujo en el conducto

$\bar{W}$  : ancho de la superficie libre promedio en el conducto

Para poder determinar una única longitud (alargada o no) para cada conducto a lo largo de toda la simulación se adaptan las expresiones anteriores utilizando parámetros asociados a la condición de sección llena:

$$L' = \max \left\{ L, \Delta t(\sqrt{gY_{full}} + Q_{full}/A_{full}) \right\} \quad (3.5)$$

Donde:

$Y_{full}$  : tirante a sección llena

$Q_{full}$  : caudal a sección llena

$A_{full}$  : área transversal del flujo a sección llena

Teniendo en cuenta la forma en la cual se decidió representar la sección transversal de calles y canales (limitadas por paredes de 3,15 y 20 m de altura respectivamente), se explica el hecho de que el segundo término sobrestime ampliamente la longitud necesaria para cumplir con la condición de Courant y por lo tanto, una gran cantidad de elementos resulten alargados innecesariamente. Se concluye entonces que, para el caso en estudio, no se justifica el uso de esta herramienta numérica.

Como se mencionó anteriormente, la optimización de la geometría de la representación de la red de drenaje significó un gran avance en cuanto al control de inestabilidades, sin requerir mayores tiempos



computacionales. Aun así, siguieron registrándose en los resultados de la simulación, series temporales con oscilaciones a lo largo de toda la cuenca. En esta instancia se realizaron ensayos de sensibilidad variando el paso temporal de cálculo (máximo) y la exigencia en la condición de Courant, sin conseguir resultados satisfactorios (Figura 3.9).

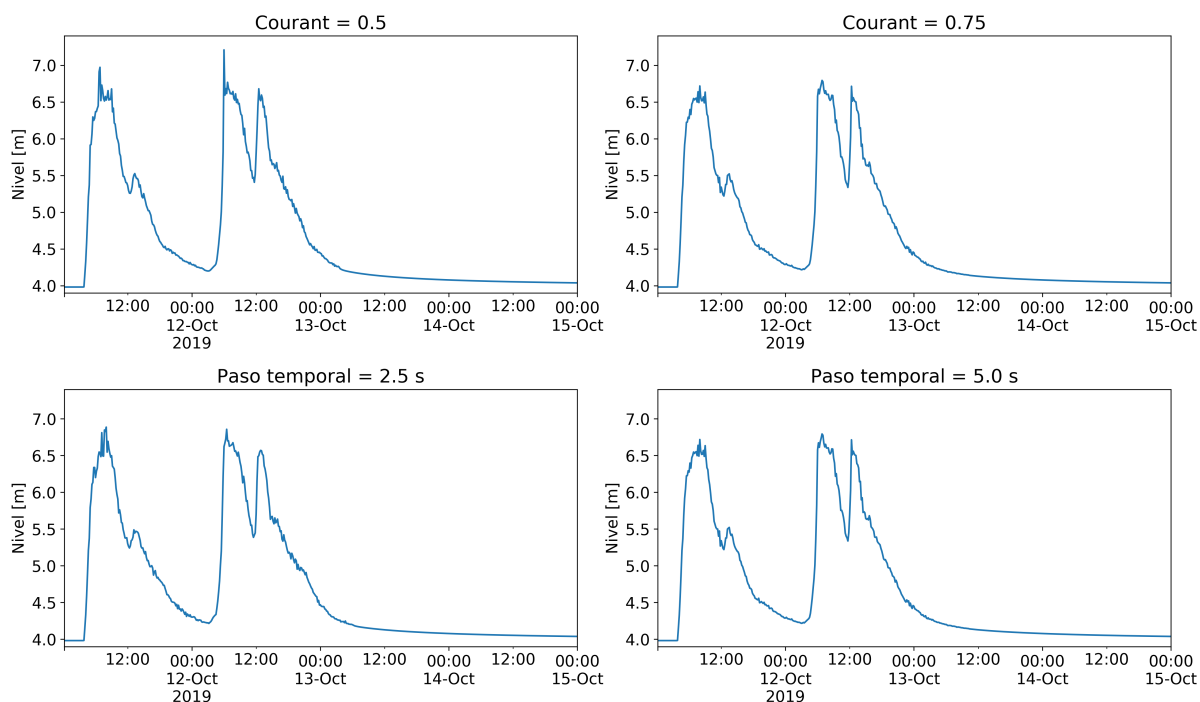


Figura 3.9: Cambios en la serie temporal de nivel en un nodo variando el número de Courant y el paso temporal de cálculo.

Finalmente, el parámetro geométrico que contribuyó enormemente al control de las oscilaciones fue la pendiente mínima en las conducciones. SWMM permite imponer fácilmente un valor mínimo a ser considerado en los cálculos. En la Figura 3.10 se presentan los hidrogramas de caudal en los conductos que no cumplen con la mínima diferencia de elevación entre extremos fijada por SWMM (0,001 ft), antes y después de establecer una pendiente mínima de 1‰. Se aprecia una sensible reducción del ruido en las series graficadas. La Figura 3.11 replica el hidrograma de la Figura 3.9 luego de modificar este parámetro.

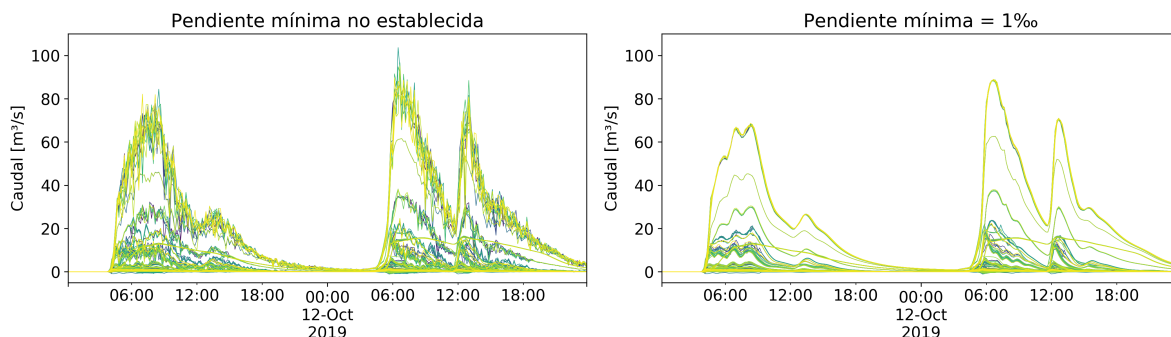


Figura 3.10: Series de caudal en conductos antes y después de imponer una pendiente mínima.

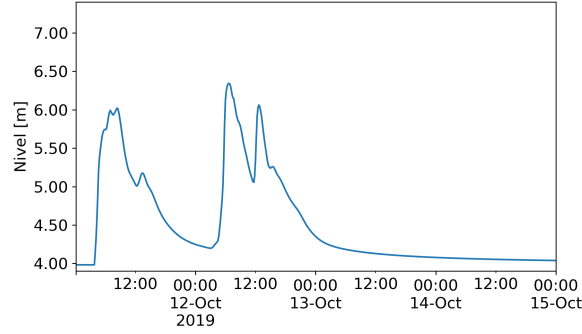


Figura 3.11: Hidrograma de la Figura 3.9 luego de imponer una pendiente mínima de 0,1 %.

### 3.2.2. Oscilaciones remanentes

Aun habiendo controlado, en términos generales, los problemas de estabilidad que afectaban los resultados de la modelación al punto de invalidarlos, continuaron presentándose hidrogramas con oscilaciones en distintos elementos de la cuenca. Se pudo detectar una de las principales causas de ruido en las series temporales de caudal, analizando la ley de descarga en los sumideros que conectan las calles con los conductos pluviales (Ecuación 3.6).

$$Q = \begin{cases} C_d A_0 \sqrt{2gH_e}, & H_1 \geq Z_0 + h \text{ (Ley de descarga orificio)} \\ C_w L (H_1 - Z_0)^{1,5}, & H_1 < Z_0 + h \text{ (Ley de descarga vertedero)} \end{cases} \quad (3.6)$$

$$C_w L = \frac{C_d A_0 \sqrt{g}}{h} \quad (3.7)$$

Donde:

- $C_d$  : coeficiente de descarga de orificio
- $C_w$  : coeficiente de descarga de vertedero
- $A_0$  : área de la abertura del sumidero
- $h$  : altura de abertura del sumidero
- $L$  : longitud del sumidero
- $H_e$  : carga hidráulica
- $H_1$  : nivel aguas arriba del sumidero
- $Z_0$  : elevación del invertido del sumidero
- $g$  : aceleración de la gravedad

Para ejemplificar se presentan los hidrogramas de caudal y nivel en un determinado orificio y las series de nivel en los nodos aguas arriba y aguas abajo del mismo (Figura 3.12). En b) se observa cómo el tirante en el orificio alcanza la altura de abertura del mismo en dos ocasiones. Durante esos intervalos de tiempo, la ley de descarga responde a ley de erogación en orificios.

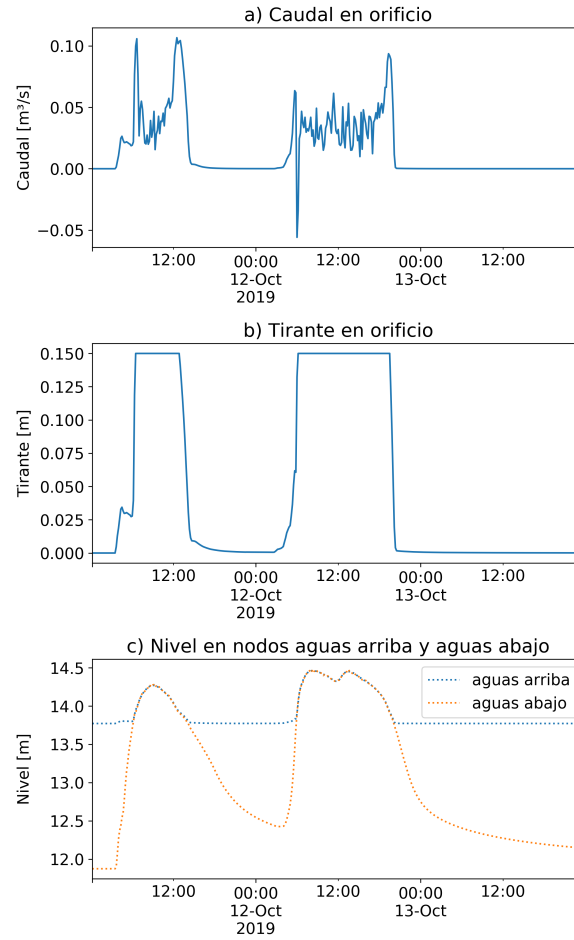


Figura 3.12: Series temporales para el análisis de un orificio en particular.

Durante esos intervalos se observa en a) fuertes oscilaciones en el caudal y en c) que el nivel tanto aguas arriba como aguas abajo es prácticamente el mismo. No son apreciables a simple vista pequeñas diferencias existentes entre ambas series de nivel, del orden de unos pocos milímetros, que explican la razón del ruido en la serie de caudal. En la Tabla 3.6 se muestran los caudales erogados asociados a diferencias milimétricas de nivel ( $H_e$ ) obtenidos a partir de la Ecuación 3.8.

$$Q = 0,66 \cdot 0,15 \, m \cdot 2,00 \, m \sqrt{2 \cdot 9,81 \, m/s^2 \cdot H_e} \quad (3.8)$$

| $H_e$ | Q                      |
|-------|------------------------|
| 1 mm  | 0,03 m <sup>3</sup> /s |
| 2 mm  | 0,04 m <sup>3</sup> /s |
| 3 mm  | 0,05 m <sup>3</sup> /s |
| 4 mm  | 0,06 m <sup>3</sup> /s |

Tabla 3.6: Caudal erogado por un sumidero en función de la carga hidráulica.

Cabe aclarar que este mismo análisis es válido si se analizan los momentos previos y posteriores a que el orificio entre en carga, donde la diferencia de niveles se mantiene en el orden de los milímetros y

la ley de erogación es la de vertedero. Incluso en estos casos, el exponente al que se encuentra elevada la carga hidráulica es mayor respecto a la ley de orificios (1,5 en lugar de 0,5).

Estas oscilaciones en los hidrogramas de caudal de los sumideros se replican en los hidrogramas de los conductos pluviales.

### 3.2.3. Control de calidad

Para poder detectar rápidamente problemas de estabilidad en los resultados de una simulación se generó el siguiente tipo de gráfico:

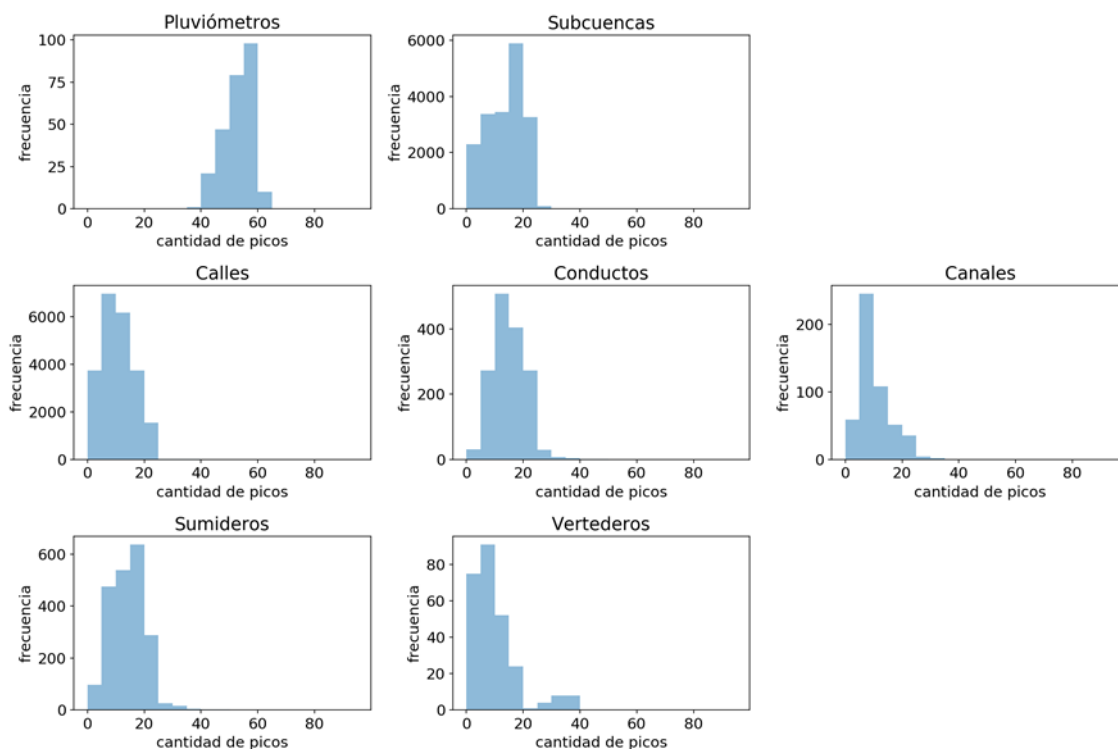


Figura 3.13: Ejemplo de gráfico para control de calidad de los resultados de una simulación.

Cada uno de los histogramas que lo componen representa el número de picos que presentan las series de caudal (ejemplo de la figura) o de nivel para cada tipo de elemento. Es decir, para generar el histograma correspondiente a, por ejemplo, los tramos de calle, se contabilizó la cantidad de picos en cada una de las serie temporales de caudal asociadas a cada uno de los más de 20000 tramos de calle que componen el modelo, y luego esa información fue sintetizada en un único histograma de frecuencia.

Histogramas ubicados hacia la izquierda respecto del histograma asociado a la información pluviométrica (forzante del modelo) son favorables. Luego de aplicar las estrategias de control detalladas en el apartado 3.2.1 se logró conseguir un modelo estable, lo cual se refleja en la posición de los histogramas de la Figura 3.13.

## 3.3. Calibración y validación

A continuación se realiza un resumen del proceso de calibración y validación del modelo, empezando por una descripción de los datos disponibles y utilizados, seguido por la caracterización de los eventos que fueron evaluados para tal fin. Luego se presenta el análisis de sensibilidad llevado a cabo con el objetivo de seleccionar adecuadamente los parámetros a calibrar, y por último se presentan los resultados obtenidos.

### 3.3.1. Datos

En los siguientes apartados se detallan las fuentes de información con las cuales se trabajó y se describe el procesamiento que recibieron los correspondientes datos para luego ser utilizados como forzantes del modelo.

#### 3.3.1.1. Fuentes

La calibración se realizó a partir de los siguientes datos:

- registros pluviométricos provenientes de doce estaciones meteorológicas localizadas dentro y en las cercanías de la cuenca (Tabla 3.7 y Figura 3.14).
- registros de nivel del arroyo San Juan.

| Estación                     | Red         | Localidad        | Partido          |
|------------------------------|-------------|------------------|------------------|
| Ingeniero Allan              | INA         | Ingeniero Allan  | Florencio Varela |
| Padre Mugica                 | INA         | Gobernador Costa | Florencio Varela |
| Municipio FV                 | Meteovarela | Florencio Varela | Florencio Varela |
| La Capilla                   | Meteovarela | La Capilla       | Florencio Varela |
| Almirante Brown <sup>1</sup> | ACUMAR      | Adrogué          | Almirante Brown  |
| Presidente Perón             | ACUMAR      | Guernica         | Presidente Perón |
| ClimaSur                     | ClimaSurGBA | Ezpeleta         | Quilmes          |
| Quilmes <sup>1</sup>         | SINARAME    | Quilmes          | Quilmes          |
| Avellaneda                   | SIMATH      | Wilde            | Avellaneda       |
| Florencio Varela             | SIMATH      | Florencio Varela | Florencio Varela |
| Almirante Brown <sup>2</sup> | SIMATH      | Claypole         | Almirante Brown  |
| Quilmes <sup>2</sup>         | SIMATH      | Quilmes Oeste    | Quilmes          |

Tabla 3.7: Estaciones meteorológicas.

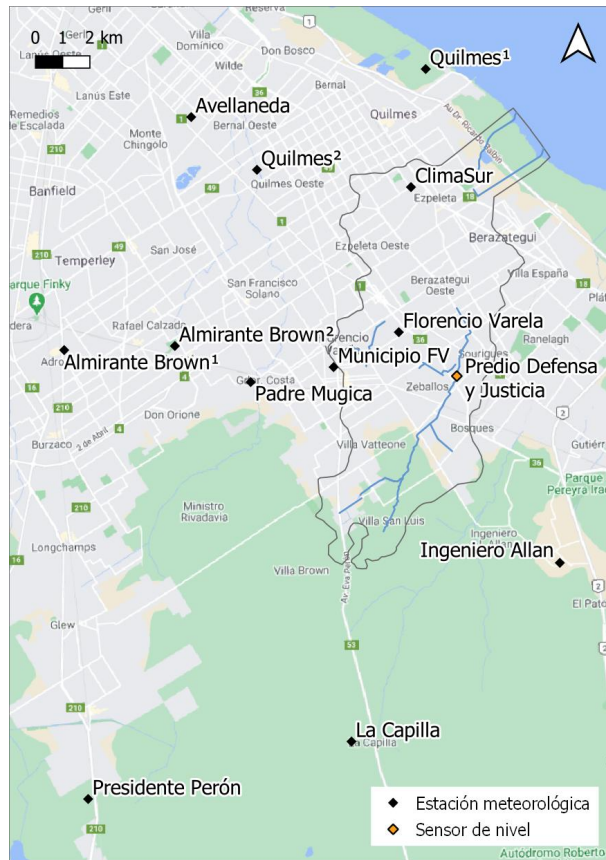


Figura 3.14: Estaciones meteorológicas y sensor de nivel.

Los registros de nivel provienen de un sensor perteneciente al sistema meteorológico municipal Me-teovarela. El equipo empleado es un registrador automático de niveles por ultrasonido con un sistema de transmisión de datos incorporado, de la marca FdX. El mismo se encuentra instalado en el predio de Defensa y Justicia en la localidad varelense de Bosques (Figura 3.15).



Figura 3.15: Sensor de nivel ubicado en el predio de Defensa y Justicia. Foto: Meteovarela.

### 3.3.1.2. Procesamiento

Los datos pluviométricos correspondientes a cada evento recibieron el siguiente procesamiento:

- a. Uniformización: Se homogeneizó el paso temporal de todas las series. Se adoptó un intervalo de 10 minutos.
- b. Tratamiento de información faltante: En los casos en que uno o más pluviógrafos registraron parcialmente el evento, los valores faltantes fueron completados a partir de la interpolación espacial de los datos registrados por los demás pluviógrafos. El método de interpolación empleado fue IDW (Inverse Distance Weighted).
- c. Creación grilla de precipitación: Se creó una grilla de 2000 m de resolución espacial sobre la zona de estudio. Para cada celda se obtuvo una serie de precipitación, resultante de la interpolación IDW de las series de los pluviógrafos disponibles.
- d. Cálculo de precipitación media areal (PMA) por subcuenca: Se calculó para cada una de las tres subcuencas (Figura 3.16) la PMA. Esta información plasmada en gráficos de barras permite rápidamente dar una idea de la magnitud y espacialidad de la tormenta.



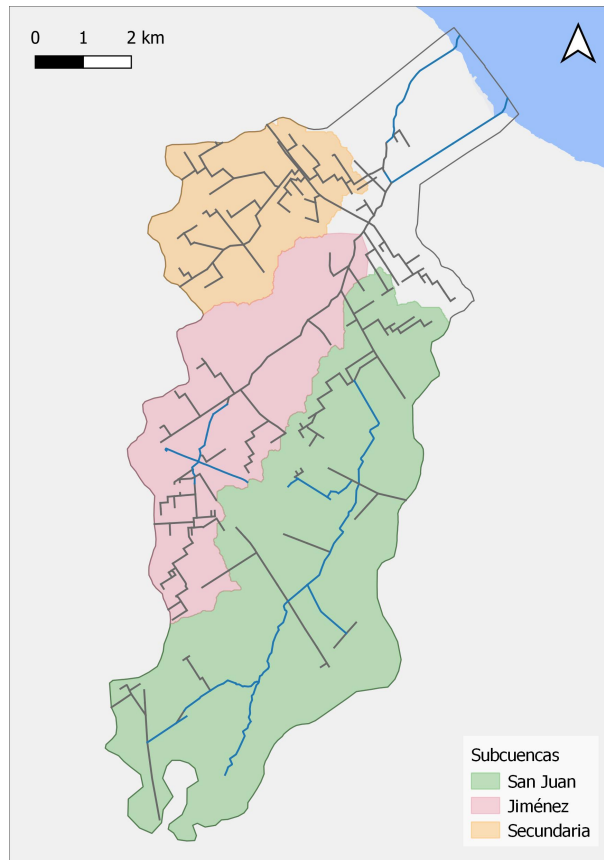


Figura 3.16: Subcuencas.

### 3.3.1.3. Incorporación al modelo SWMM

En un modelo SWMM cada pluviómetro contiene la información de una serie de precipitación, la cual puede estar incorporada en el mismo modelo o bien, importarse desde un archivo externo. Luego a cada subcuenca se le asigna el pluviómetro correspondiente. A la hora de generar un modelo a través de ConuPy se debe dar como dato de entrada un archivo de texto que relacione la denominación de cada pluviómetro, con su ubicación, y con el nombre del archivo que contenga la serie de precipitación. En cuanto a la asignación de los pluviómetros a cada subcuenca, ConuPy lo hace automáticamente delimitando el área de influencia de cada uno mediante la construcción de polígonos de Thiessen. Para este estudio se trabajó con pluviómetros ficticios, es decir, no se cargaron al modelo los doce pluviómetros correspondientes a las estaciones meteorológicas de la zona. En su lugar, se creó un pluviómetro ficticio por cada celda de la grilla de precipitación mencionada en el ítem c. del apartado precedente. Siendo el tamaño de grilla de 16 x 16, en total se modelaron 256 pluviómetros ficticios.

### 3.3.2. Eventos

El modelo fue calibrado y validado a partir de cinco eventos de tormenta registrados en la zona durante el 2019. Los eventos seleccionados fueron los siguientes:

- 13 de junio de 2019 (PMA = 131 mm)
- 1 de octubre de 2019 (PMA = 39 mm)
- 11 de octubre de 2019 (PMA = 114 mm)

- 17 de octubre de 2019 (PMA = 26 mm)
- 30 de diciembre de 2019 (PMA = 42 mm)

### 3.3.2.1. Caracterización de los eventos

A continuación se presentan los resultados del procesamiento de datos pluviométricos detallado en la subsección 3.3.1.2. En las Figuras 3.17 a 3.21 se observan los registros de precipitación acumulada en cada una de las estaciones meteorológicas activas al momento del evento. Se incluye además un gráfico de barras que expone la PMA en el total de la cuenca y en cada una de las subcuencas indicadas en la Figura 3.16. La variabilidad espacial de la precipitación puede apreciarse en las Figuras 3.22 a 3.26. Por último, en la Figura 3.27 se presentan para cada uno de los cinco eventos de trabajo, los hidrogramas de nivel registrados en el arroyo San Juan junto a sus hietogramas asociados.

Nota: las estaciones pertenecientes a la red del Sistema Integrado de Monitoreo y Alerta Temprana Hidroambiental (SIMATH) se indican con una letra S al final del nombre.

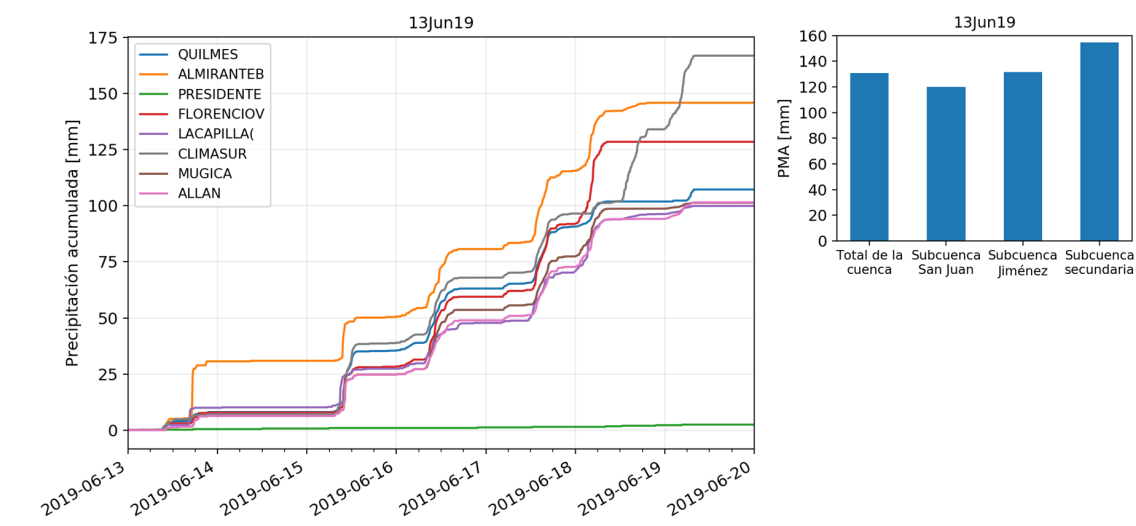


Figura 3.17: Evento 13 de junio de 2019. Precipitación acumulada (izq.) y PMA total y por subcuencas (der.).

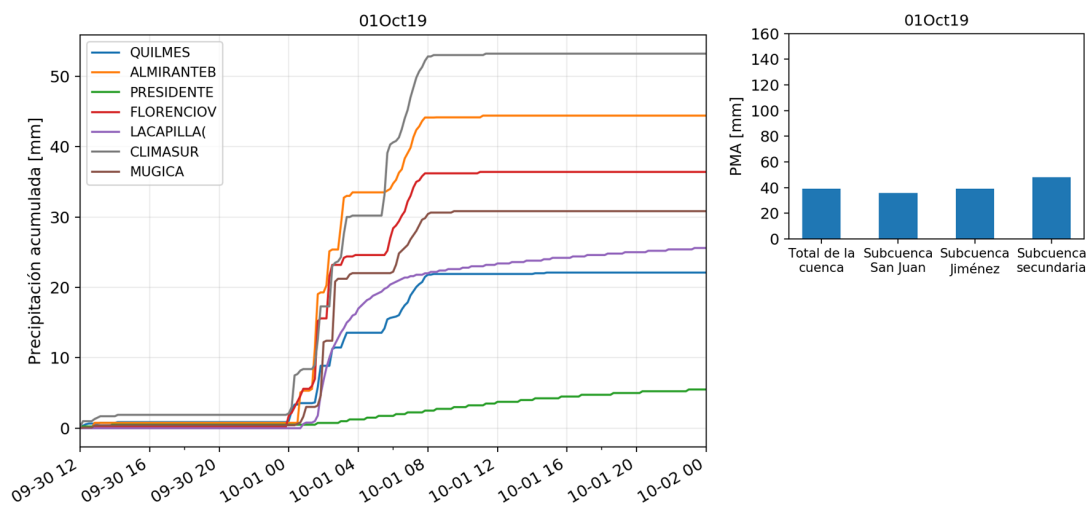


Figura 3.18: Evento 1 de octubre de 2019. Precipitación acumulada (izq.) y PMA total y por subcuencas (der.).

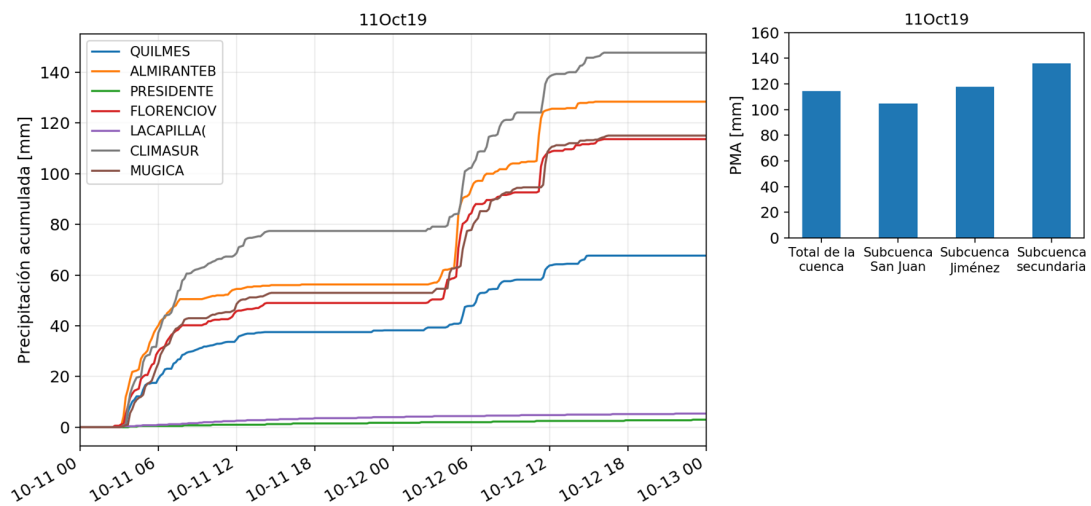


Figura 3.19: Evento 11 de octubre de 2019. Precipitación acumulada (izq.) y PMA total y por subcuencas (der.).

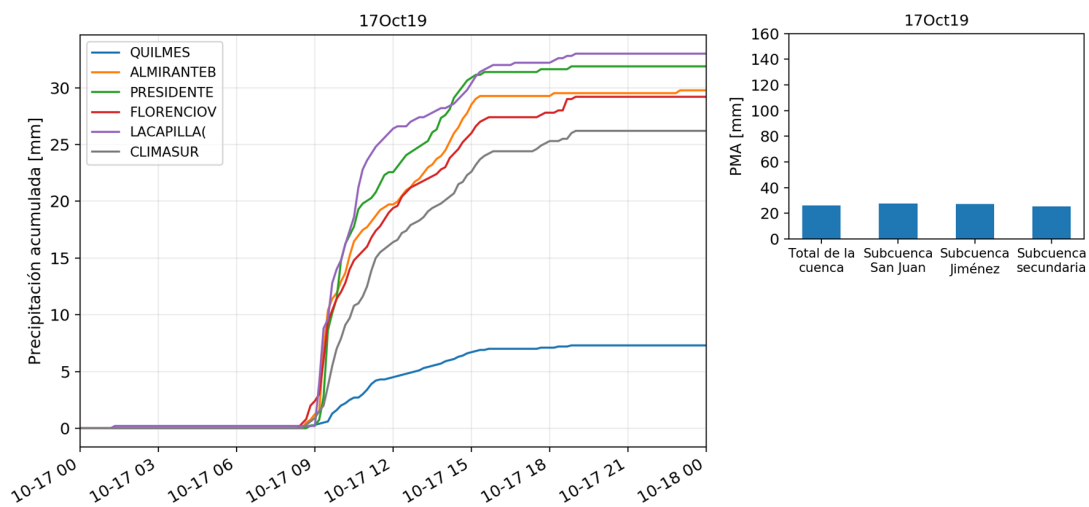


Figura 3.20: Evento 17 de octubre de 2019. Precipitación acumulada (izq.) y PMA total y por subcuencas (der.).

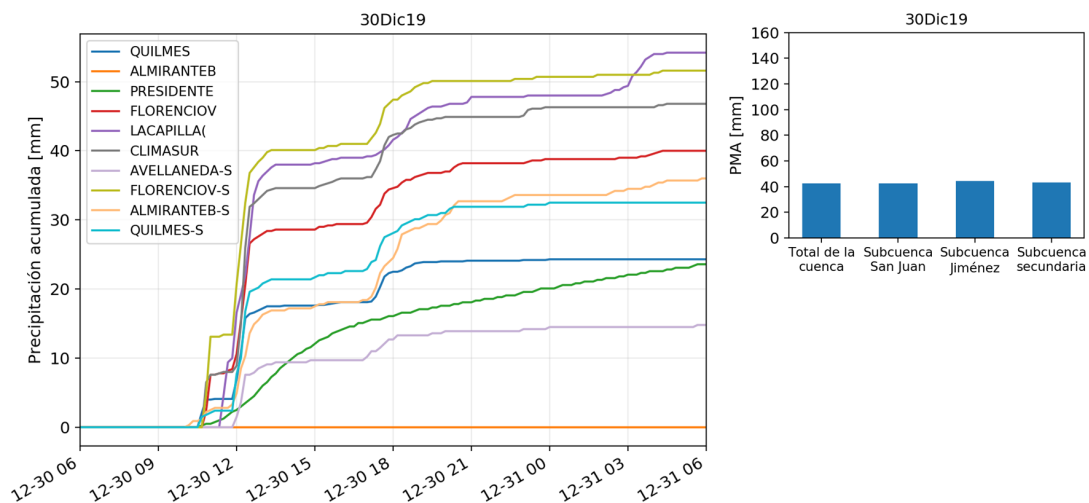


Figura 3.21: Evento 30 de diciembre de 2019. Precipitación acumulada (izq.) y PMA total y por subcuencas (der.).

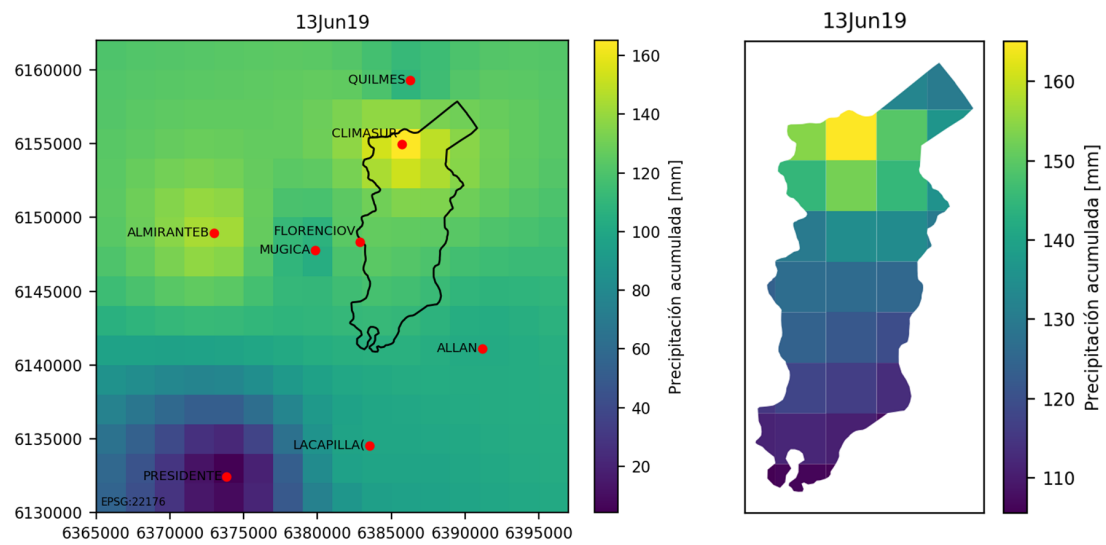


Figura 3.22: Evento 13 de junio de 2019. Grilla de precipitación acumulada.

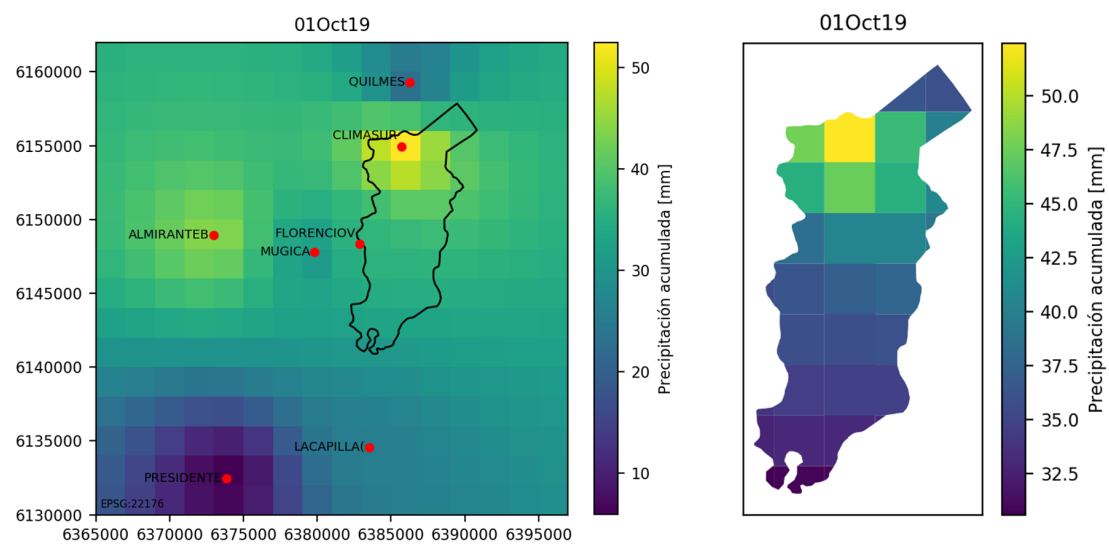


Figura 3.23: Evento 1 de octubre de 2019. Grilla de precipitación acumulada.

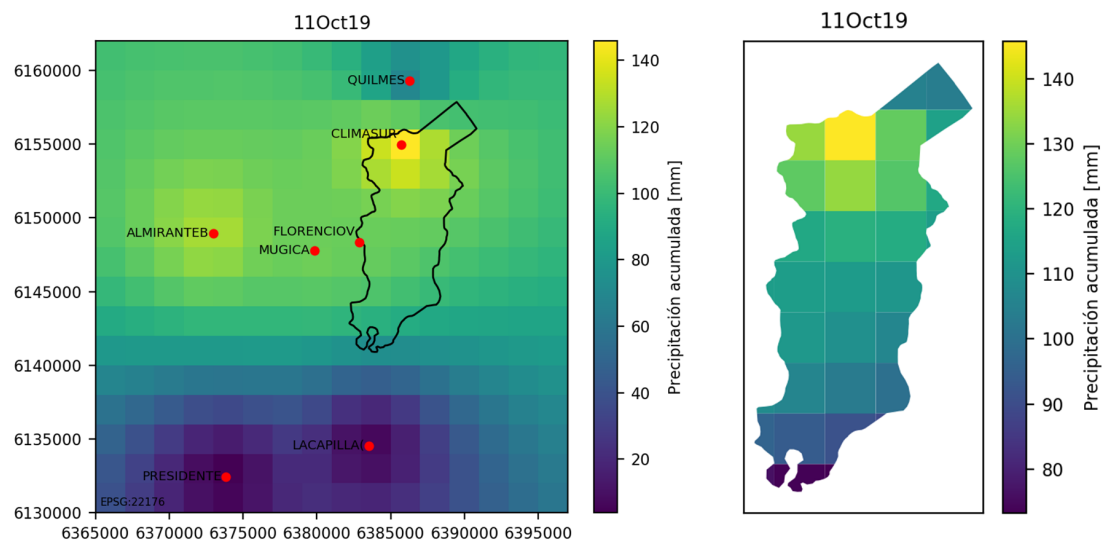


Figura 3.24: Evento 11 de octubre de 2019. Grilla de precipitación acumulada.

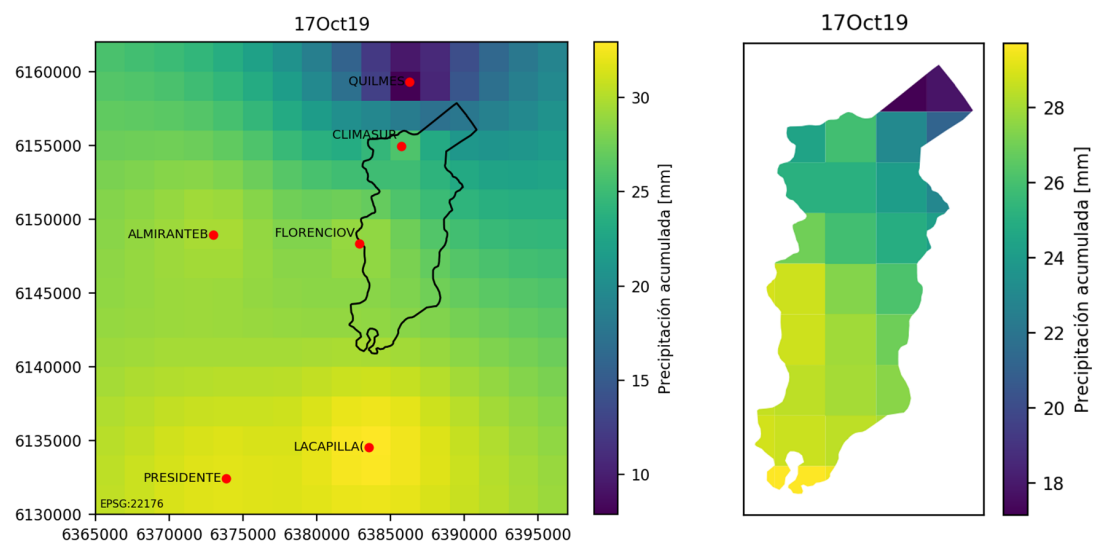


Figura 3.25: Evento 17 de octubre de 2019. Grilla de precipitación acumulada.

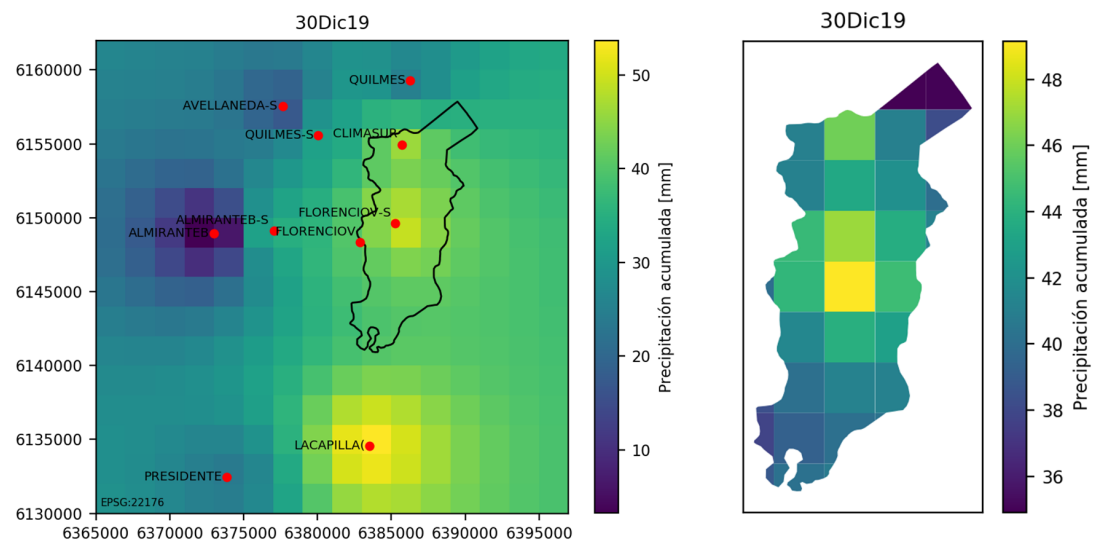


Figura 3.26: Evento 30 de diciembre de 2019. Grilla de precipitación acumulada.



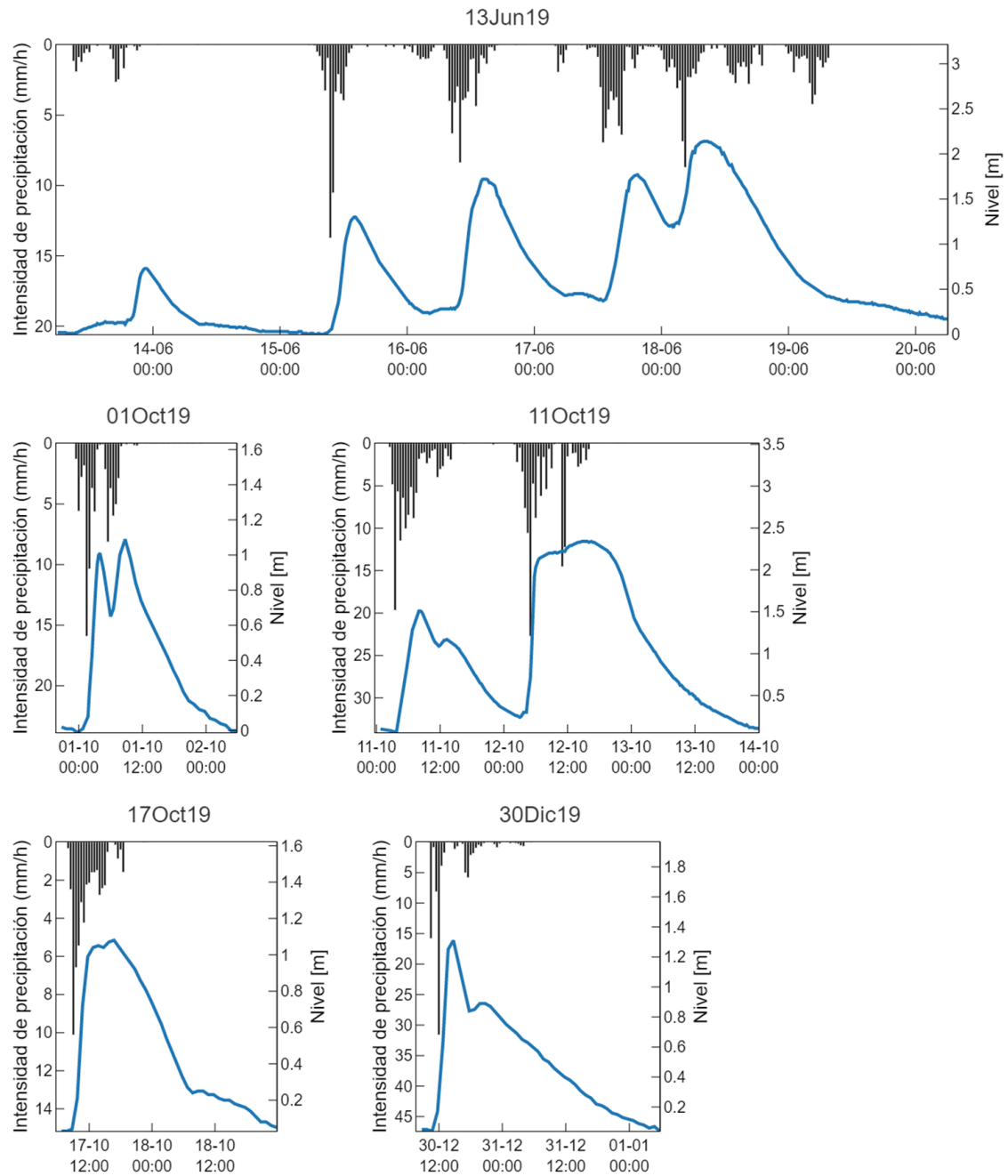


Figura 3.27: Hietogramas e hidrogramas de nivel en el arroyo San Juan, correspondientes a los cinco eventos de trabajo.

### 3.3.3. Análisis de sensibilidad

Se realizó un análisis de sensibilidad para cuantificar la influencia de los distintos parámetros del modelo en los resultados de la modelación y de esa forma, seleccionar las variables de calibración. El análisis se llevó a cabo realizando numerosas simulaciones, imponiendo en cada una, una variación porcentual específica en un parámetro determinado. En la Tabla 3.8 se indica el conjunto de parámetros hidráulicos e hidrológicos estudiado. El evento seleccionado para llevar a cabo el análisis fue el del 11 de octubre de

| Parámetro                                                        | Módulo      |
|------------------------------------------------------------------|-------------|
| Rugosidad en calles                                              | Hidráulico  |
| Rugosidad en conductos                                           | Hidráulico  |
| Rugosidad en canales                                             | Hidráulico  |
| Rugosidad en áreas permeables                                    | Hidrológico |
| Rugosidad en áreas impermeables                                  | Hidrológico |
| Profundidad de almacenamiento en depresión en áreas permeables   | Hidrológico |
| Profundidad de almacenamiento en depresión en áreas impermeables | Hidráulico  |

Tabla 3.8: Conjunto de parámetros analizados en los ensayos de sensibilidad.

La variable elegida para cuantificar las variaciones en los resultados fue la altura promedio en los nodos de la red de drenaje. Se estudiaron por separado los nodos de almacenamiento (nodos superficiales de la red) y los nodos de unión (nodos de conexión entre tramos de conductos y/o canales). Los resultados de los ensayos se presentan en las Figuras 3.28 y 3.29.

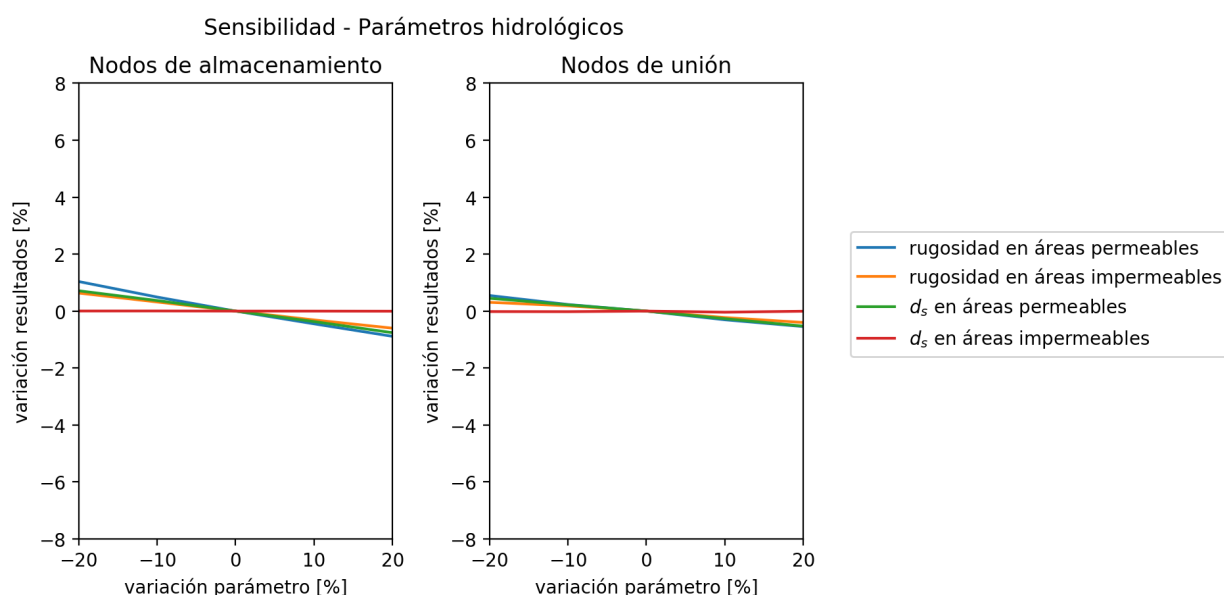


Figura 3.28: Resultados ensayos de sensibilidad a parámetros hidrológicos seleccionados.

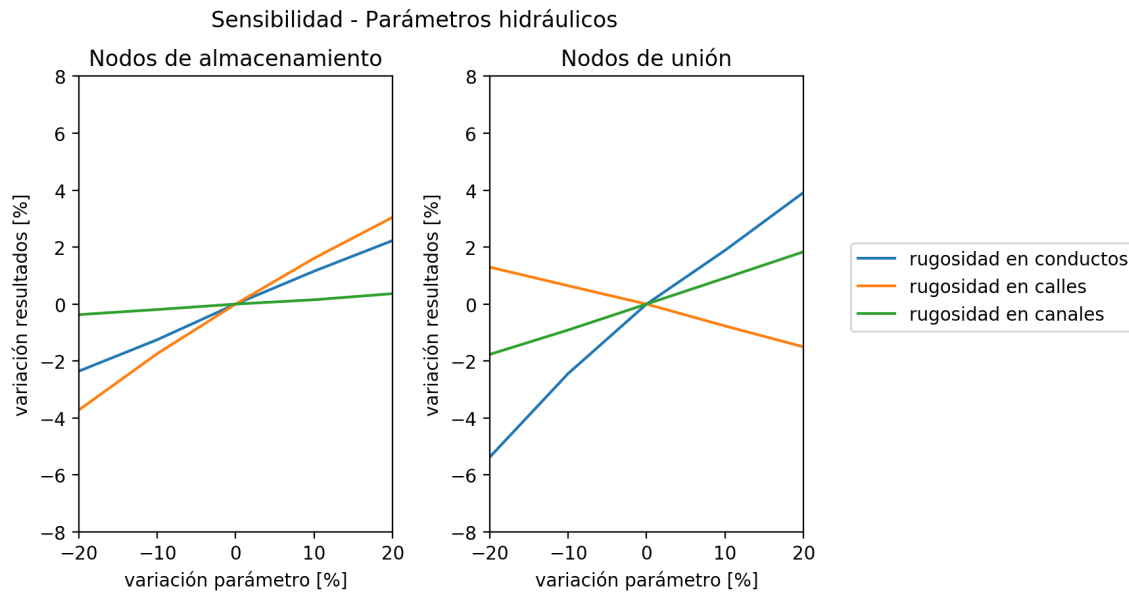


Figura 3.29: Resultados ensayos de sensibilidad a parámetros hidráulicos seleccionados.

La Figura 3.28 muestra que la modelación es poco sensible a variaciones en los cuatro parámetros hidrológicos estudiados. En cuanto a los parámetros hidráulicos, se observan respuestas distintas según se analicen nodos de almacenamiento o de unión (Figura 3.29).

El nivel en los nodos superficiales es más sensible a los cambios en la rugosidad de las calles que a las modificaciones en la rugosidad de canales y conductos. Esto puede explicarse teniendo en cuenta que gran parte de los nodos superficiales se encuentran alejados de las ramificaciones del subsistema de drenaje enterrado, por lo que la rugosidad de los elementos que componen dicho subsistema influye en un número reducido de nodos. Ese mismo análisis puede extrapolarse para entender el menor peso de la rugosidad de canales frente a la de los conductos.

En el caso de los nodos de unión puede realizarse un análisis similar, es mayor la cantidad de nodos conectados a conductos que a canales, por lo que en parte puede explicarse la mayor sensibilidad a los cambios de rugosidad en los primeros. Por otra parte, se observa que la pendiente de la curva de sensibilidad correspondiente a la rugosidad en calles es negativa. Esto indica que al elevar la resistencia al flujo, la proporción de agua almacenada en calles aumenta, atenuando los picos de los hidrogramas en las conducciones enterradas.

Por otro lado, se analizó la influencia de estos parámetros en la variable de calibración: tirante del arroyo San Juan en la sección donde se ubica el sensor de nivel. El hidrograma simulado prácticamente no presenta modificaciones al introducir variaciones en los coeficientes de Manning correspondientes a calles y conductos, como sí lo hace para el caso de canales (Figura 3.30).

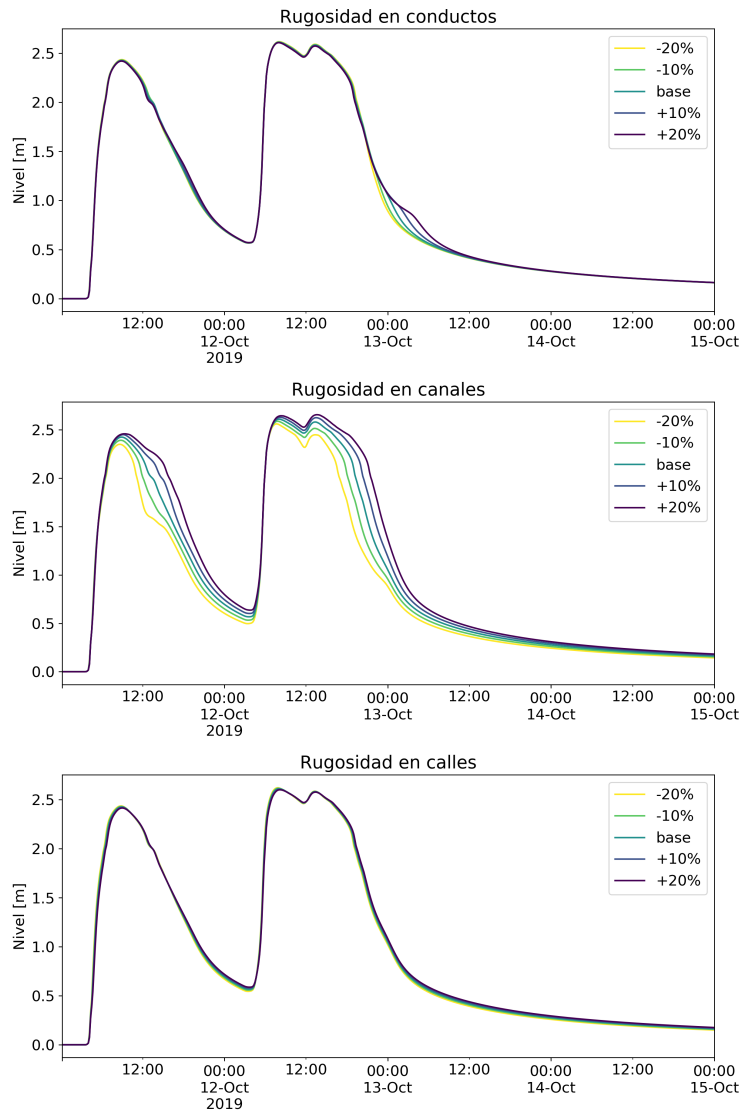


Figura 3.30: Variaciones en el hidrograma de nivel simulado al modificar el coeficiente de Manning correspondiente a conductos, canales y calles.

Finalmente se decidió seleccionar la rugosidad de canales y el porcentaje de ruteo entre subáreas como los dos parámetros a ajustar en el proceso de calibración. Este último parámetro no fue tenido en cuenta en los ensayos de sensibilidad presentados (no se consideró ruteo entre subáreas) pero posteriormente se comprobó la importancia de modelar este proceso. En la Figura 3.31 pueden apreciarse los cambios en un hidrograma de nivel asociados a variaciones de ambos parámetros. Mientras el porcentaje de ruteo impacta exclusivamente en la altura de los picos, el coeficiente de Manning adoptado para canales también afecta la temporalidad del hidrograma.

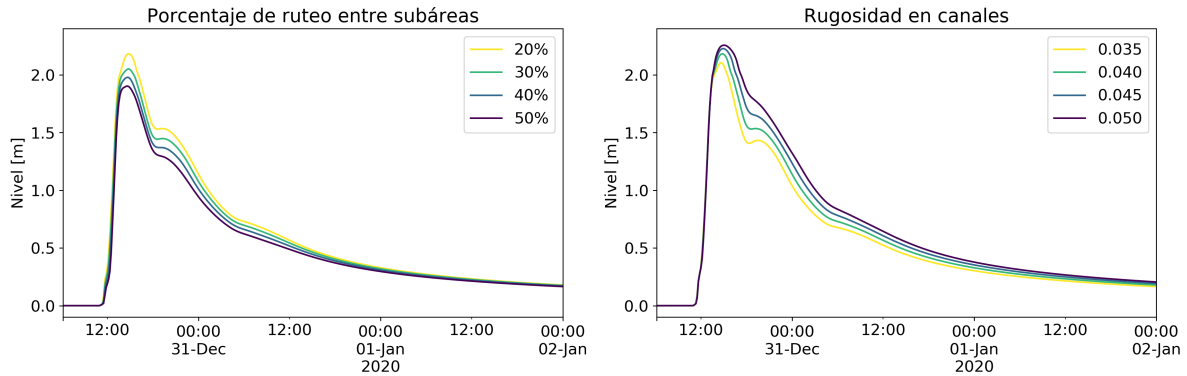


Figura 3.31: Variaciones en el hidrograma de nivel simulado al modificar los parámetros de calibración.

### 3.3.4. Calibración

Para la calibración se seleccionaron dos de los cinco eventos descritos anteriormente en la subsección 3.3.2. Por un lado, se decidió utilizar para esta etapa el evento del 13 de junio de 2019. Con una PMA sobre la cuenca de 131 mm es el evento de mayor magnitud registrado durante ese año. Presenta además frente al resto una importante ventaja: es el único que cuenta con información pluviométrica al Este de la cuenca (Figura 3.22). El hidrograma asociado registrado por el sensor de nivel del arroyo San Juan, está compuesto por una sucesión de cinco picos bien definidos. De todos modos, solo fueron considerados para la calibración los primeros dos picos, ya que a partir del día 16 los registros pluviométricos se vieron afectados por sucesivos cortes en el suministro eléctrico a raíz de una falla a nivel nacional del Sistema Argentino de Interconexión. Por otro lado, se eligió para la calibración, con una PMA sobre la cuenca de 26 mm, el evento del 17 de octubre de 2019. En la Figura 3.32 se presentan los registros de nivel asociados a ambos eventos, y se destacan en línea continua los tres intervalos temporales con los cuales se trabajó.

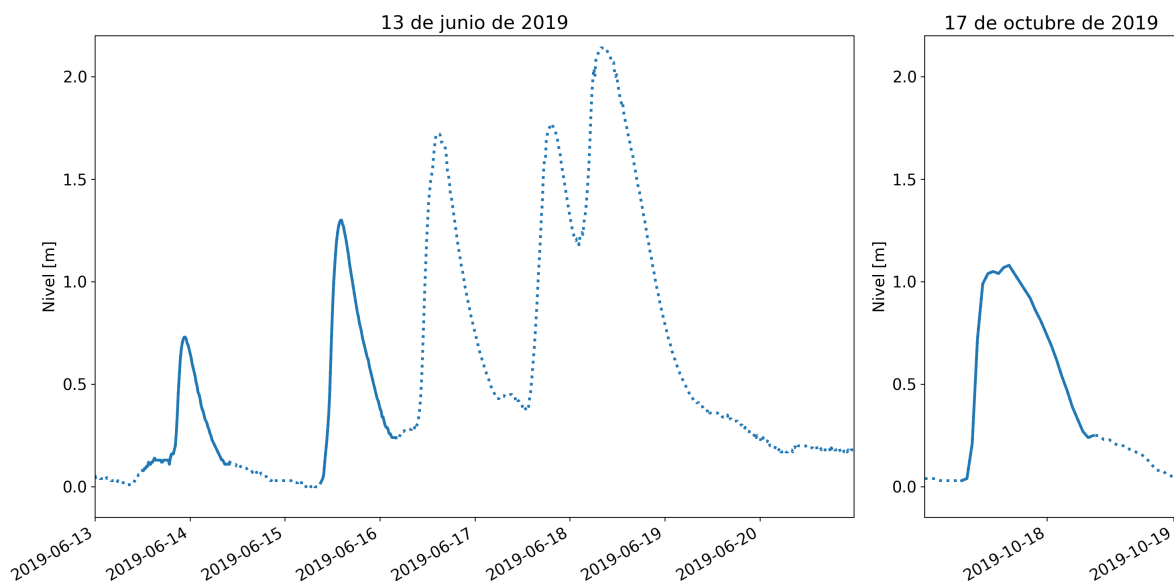


Figura 3.32: Eventos seleccionados para la calibración. En línea continua se indican los tres intervalos considerados.

Como se adelantó en el análisis de sensibilidad, los parámetros de calibración fueron la rugosidad en canales y el porcentaje de ruteo entre subáreas en subcuencas clasificadas como impermeables. Los indicadores utilizados para evaluar la performance del modelo se presentan en la Tabla 3.9.

| Indicador                        | Expresión matemática                                                                                                                                                                                                                                 | Rango                                 | Aspecto evaluado                                                |
|----------------------------------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|---------------------------------------|-----------------------------------------------------------------|
| PE<br>Peak Error                 | $PE = h_{max}^{sim} - h_{max}^{obs}$                                                                                                                                                                                                                 | $-\infty$ a $+\infty$<br>objetivo = 0 | Capacidad de predecir valores máximos                           |
| RMSE<br>Root Mean Square Error   | $RMSE = \sqrt{\frac{100}{n} \sum_{i=1}^n (h_i^{sim} - h_i^{obs})^2}$                                                                                                                                                                                 | 0 a $\infty$<br>objetivo = 0          | Error global                                                    |
| DS<br>Directional Symmetry       | $DS = \frac{1}{n-1} \sum_{i=2}^n d_i$ $d_i = \begin{cases} 1 & \text{si } (h_i^{sim} - h_{i-1}^{sim})(h_i^{obs} - h_{i-1}^{obs}) > 0 \\ 1 & \text{si } (h_i^{sim} - h_{i-1}^{sim}) = (h_i^{obs} - h_{i-1}^{obs}) = 0 \\ 0 & \text{sino} \end{cases}$ | 0 a 100<br>objetivo = 100             | Capacidad de predecir temporalidad                              |
| NSE<br>Nash-Sutcliffe Efficiency | $NSE = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n (h_i^{sim} - h_i^{obs})^2}{\sum_{i=1}^n (h_i^{obs} - \bar{h}^{obs})^2}$                                                                                                                                                | $-\infty$ a 1<br>objetivo = 1         | Error relativo respecto a la varianza de los valores observados |

Tabla 3.9: Indicadores de performance evaluados.

El criterio adoptado para elegir el par de parámetros óptimo se basó en la minimización del promedio de los valores absolutos del indicador PE evaluado en cada uno de los tres intervalos considerados. Los valores de los parámetros así calibrados resultaron 0,035 para el coeficiente de Manning en canales, y 50 % para el ruteo entre subáreas. En la Figura 3.33 y la Tabla 3.10 se presentan los resultados de la calibración.

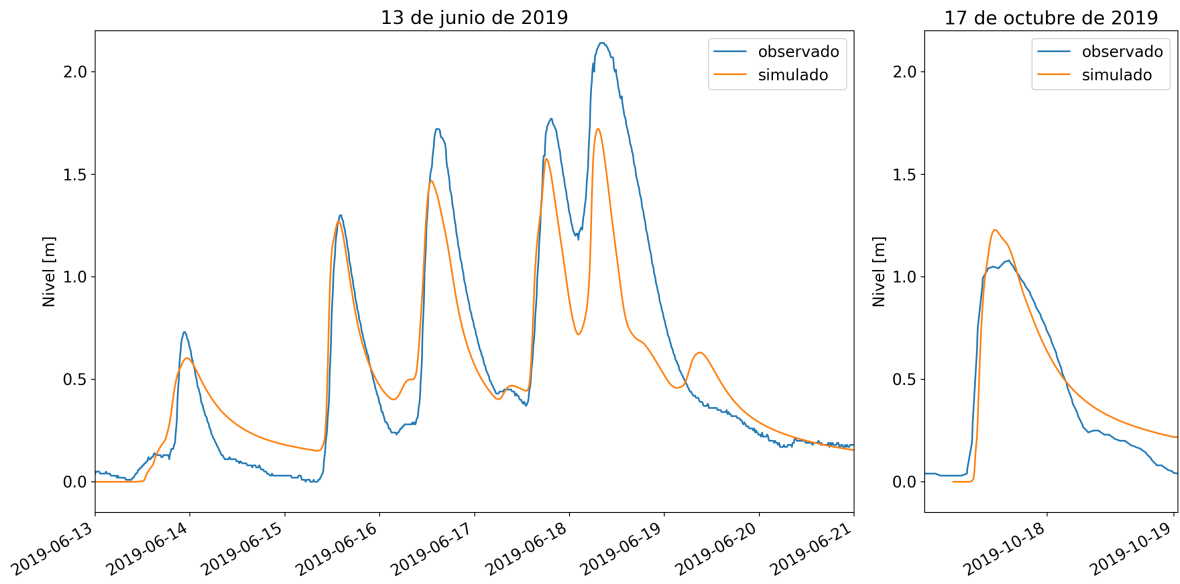


Figura 3.33: Resultados de la calibración.

| Indicador | Pico 1  | Pico 2  | Pico 3  | Promedio |
|-----------|---------|---------|---------|----------|
| PE        | -0,13 m | -0,03 m | +0,15 m | 0,10 m   |
| RMSE      | 0,13 m  | 0,13 m  | 0,13 m  | 0,13 m   |
| DS        | 60,9 %  | 81,6 %  | 80,0 %  | 74,2 %   |
| NSE       | 0,58    | 0,88    | 0,85    | 0,77     |

Tabla 3.10: Indicadores de performance para los eventos de calibración.

Las diferencias entre los niveles simulados y observados pueden explicarse teniendo en cuenta la incertidumbre asociada a la información pluviométrica, sumada a la sensibilidad del modelo frente a variaciones en el forzante (Figura 3.34). En ese sentido, puede observarse que por ejemplo, en el caso del evento del 17 de octubre, un aumento o disminución del 10 % del volumen precipitado se traduce en una variación de aproximadamente 7 cm del nivel máximo alcanzado, magnitud que resulta comparable al PE de 15 cm obtenido luego de la calibración.

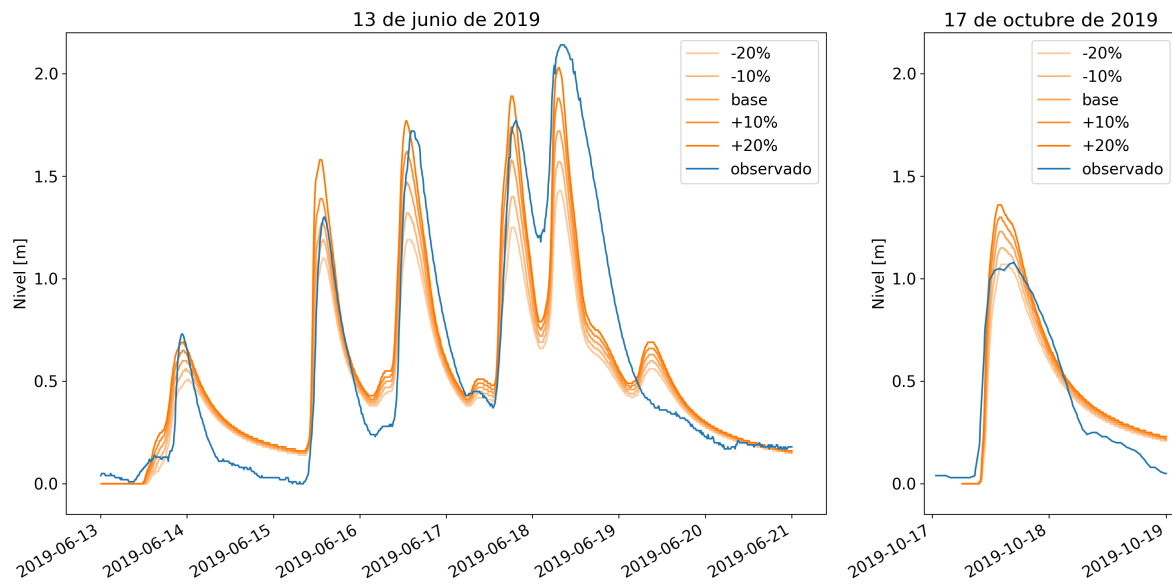


Figura 3.34: Resultados de ensayos de sensibilidad frente a variaciones en el forzante.

### 3.3.5. Validación

La validación se llevó a cabo evaluando la performance del modelo en los eventos correspondientes al 1 de octubre, 11 de octubre y 30 de diciembre de 2019. Los mismos se encuentran caracterizados en la subsección 3.3.2. Las series de nivel en el arroyo San Juan simuladas y observadas se muestran en la Figura 3.35 y los indicadores asociados en la Tabla 3.11.



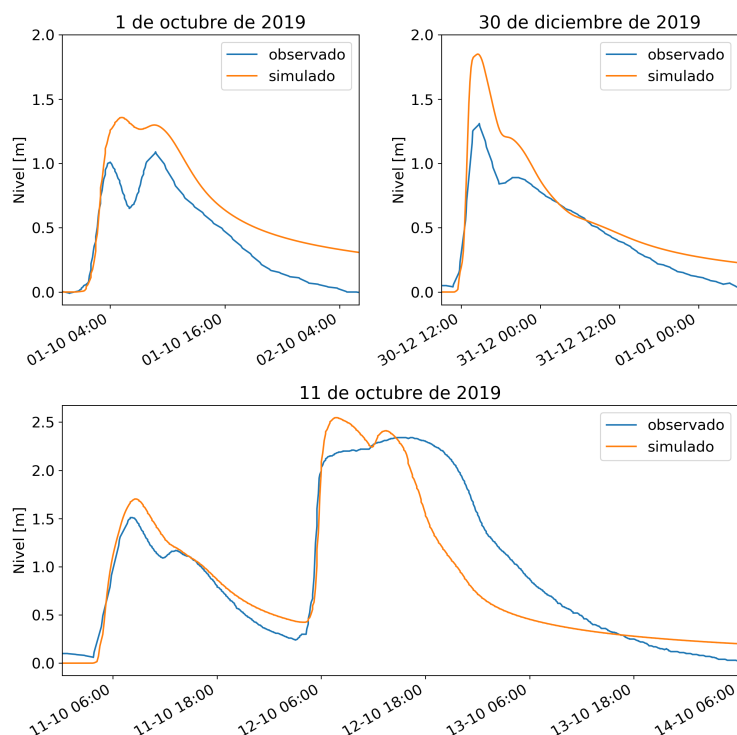


Figura 3.35: Resultados de la validación.

| Indicador | 01 Oct 2019 | 11 Oct 2019 | 30 Dic 2019 |
|-----------|-------------|-------------|-------------|
| PE        | +0,27 m     | +0,21 m     | +0,54 m     |
| RMSE      | 0,30 m      | 0,37 m      | 0,22 m      |
| DS        | 59,7 %      | 56,4 %      | 63,5 %      |
| NSE       | 0,32        | 0,78        | 0,60        |

Tabla 3.11: Indicadores de performance para los eventos de validación.

Los indicadores se consideran satisfactorios en términos generales, teniendo en consideración la falta de información pluviométrica al Este de la cuenca (ver Figuras 3.23, 3.24 y 3.26).

Asimismo, un importante volumen de información recopilada acerca de los impactos del evento del 11 de octubre de 2019 en el partido de Florencio Varela, permitió avanzar con una segunda instancia de validación, ya no limitada a un único punto, sino a nivel cuenca. Los datos utilizados se obtuvieron de dos fuentes: información georreferenciada provista por el municipio de Florencio Varela acerca de los reclamos realizados por vecinos durante el evento, y publicaciones en el grupo de Facebook “Vecinos Varelenenses”. En la Figura 3.36 se presentan los resultados. El elevado grado de concordancia espacial entre las zonas donde los resultados de la simulación indican tirantes en calle por encima de 15 cm y la ubicación de los impactos recopilados, refuerza la validación del modelo realizada en base a indicadores cuantitativos. Por otra parte, en la Figura 3.37 se comparan los mismos resultados pero esta vez frente a zonas inundables delimitadas por el municipio de Florencio Varela. Se observa buena coincidencia de las zonas afectadas.

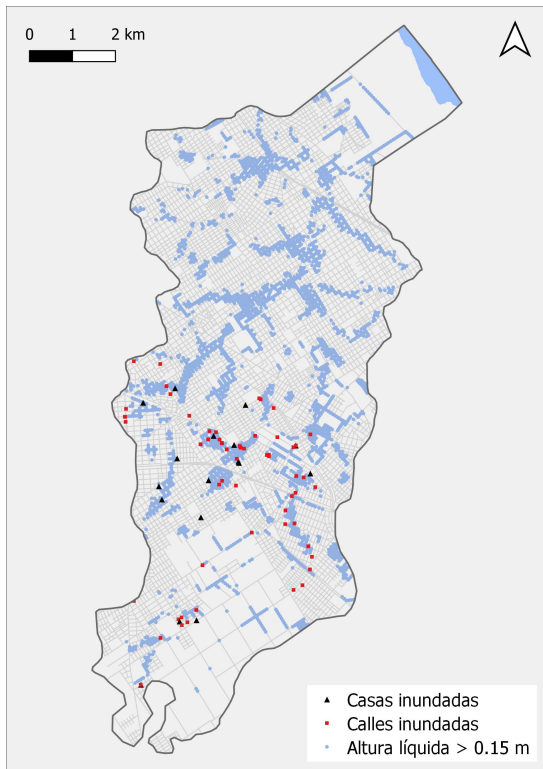


Figura 3.36: Validación a partir de publicaciones en Facebook y reclamos al municipio de Florencio Varela.

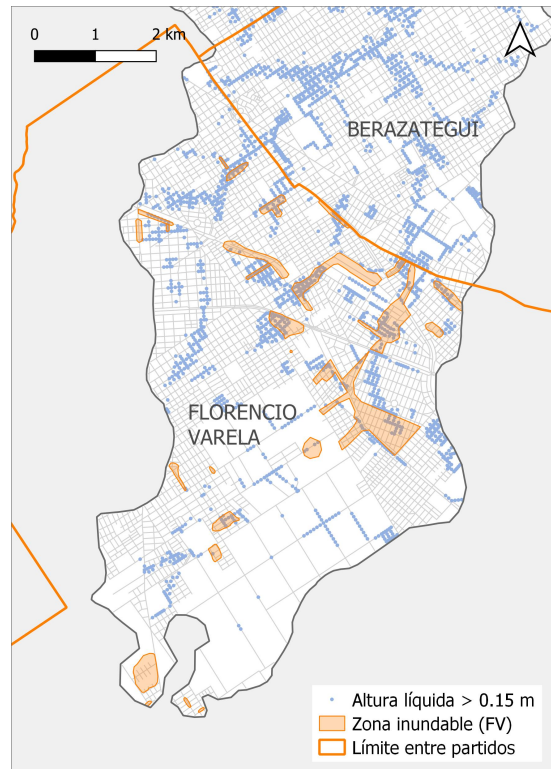


Figura 3.37: Comparación con zonas inundables trazadas por el municipio de Florencio Varela.

## Capítulo 4

# Simulaciones realizadas

En este capítulo se describen las simulaciones realizadas para llevar a cabo la explotación del modelo persiguiendo el objetivo principal de caracterizar la capacidad de respuesta del sistema de drenaje de la cuenca. En primer lugar se realizaron corridas múltiples asociadas a eventos sintéticos y luego se simularon distintos escenarios para evaluar el comportamiento de la cuenca ya sea frente a un evento de precipitación extraordinario, o ante un avance de la frontera urbana.

### 4.1. Corridas múltiples

Se simularon eventos de tormenta sintéticos, cada uno de ellos definido por una duración y una intensidad de precipitación determinadas. Se fijaron intensidades de trabajo desde los 5 hasta los 60 mm/h en intervalos regulares de 5 mm/h. En cuanto a las duraciones, se consideraron periodos de hasta 3 horas tomados cada 10 minutos. El número total de simulaciones realizadas fue 216. Para poder interpretar los resultados se generaron distintos tipos de gráficos, los cuales se describen en los siguientes apartados.

#### 4.1.1. Mapas espaciales asociados a eventos de precipitación

Cada uno de estos mapas se encuentra asociado a una determinada simulación y, por lo tanto, a un evento de precipitación sintético. Mediante una escala cromática se representa la situación de cada nodo del modelo en función de la variable en estudio. En el caso de los nodos de calle la variable analizada se trata del máximo tirante de agua alcanzado, y se categoriza en cuatro rangos según el impacto asociado. Los umbrales considerados fueron los siguientes:

- 0,05 m: presencia de agua en calle
- 0,30 m: ingreso de agua en las viviendas [Re et al., 2019]
- 0,60 m: el agua alcanza la altura de superación de muebles (camas, sillas y otros) [Re et al., 2019]
- 1,00 m: riesgo de ahogamiento en niños [Milanesi et al., 2015]
- 1,40 m: riesgo de ahogamiento en adultos [Milanesi et al., 2015]

En cambio, en los nodos de unión entre conducciones, se evalúa si la capacidad de la conducción es o no superada durante el evento. En las Figuras 4.1 y 4.2 se presentan ejemplos de esta tipología de mapas.

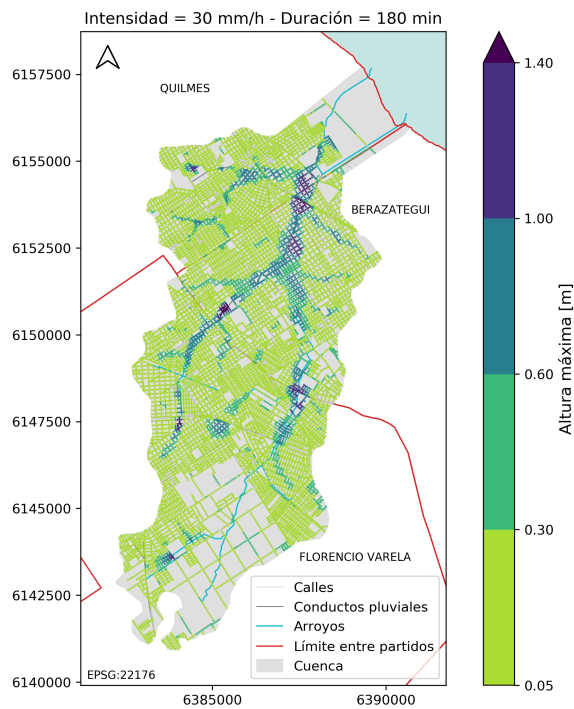


Figura 4.1: Ejemplo de mapa espacial asociado a un evento sintético. Variable: altura de agua en calle.

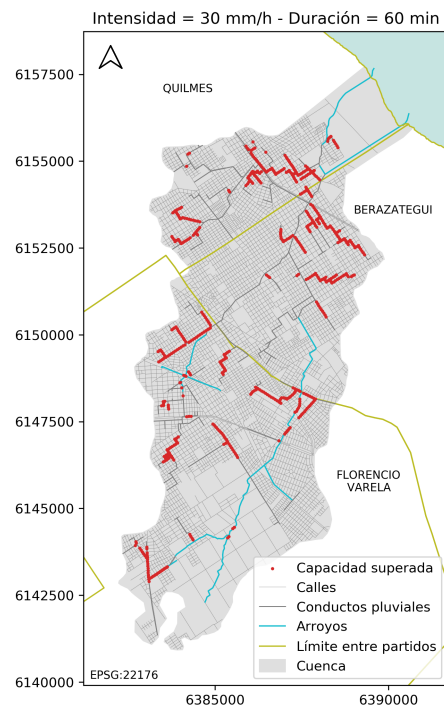


Figura 4.2: Ejemplo de mapa espacial asociado a un evento sintético. Variable: capacidad superada en conductos y canales.

#### 4.1.2. Mapas espaciales de duración

Estos mapas ya no están asociados cada uno a una única simulación, sino que integran los resultados de un conjunto de simulaciones. Cada uno de estos gráficos se corresponde con un evento adverso y una intensidad determinados. El evento puede ser por ejemplo, la superación de cierto nivel de inundación o bien el momento en que un conducto pluvial entra en carga. Se representa de manera georreferenciada sobre el mapa de la cuenca y mediante una escala cromática, la duración a partir de la cual ocurre el fenómeno indeseado en determinado punto. Para ejemplificar se incluyen las Figuras 4.3 y 4.4.

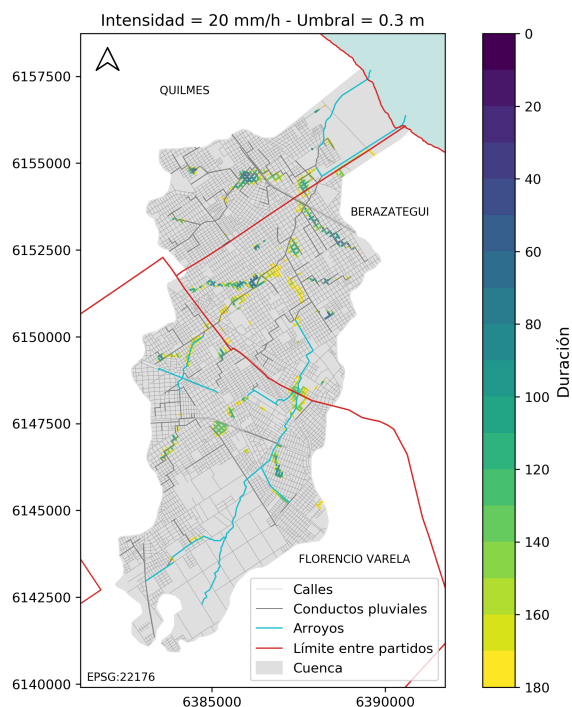


Figura 4.3: Ejemplo de mapa espacial de duración. Evento adverso: altura en calle por encima de 0,30 m (ingreso de agua en las viviendas).

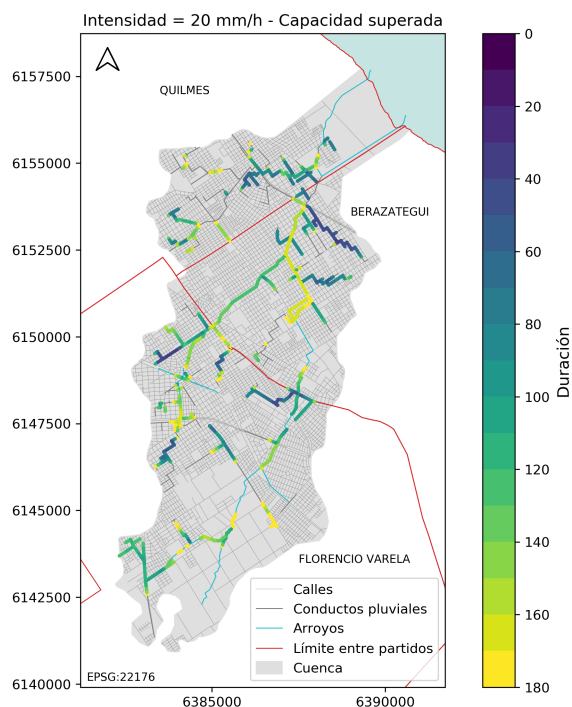


Figura 4.4: Ejemplo de mapa espacial de duración. Evento adverso: capacidad superada en conductos y canales.

### 4.1.3. Gráficos intensidad-duración

Estos gráficos cuentan con tres dimensiones: duración en el eje  $x$ , intensidad en el eje  $y$ , y la variable en estudio asociada a un nodo o conducción particular, representada mediante una escala cromática discreta. Cada simulación representa un punto en el plano intensidad-duración e interpolando se obtiene el valor de la variable en todo el dominio. Estos gráficos condensan información proveniente del total de las 216 simulaciones, permitiendo estimar la situación en un punto de interés frente a un evento de intensidad media y duración conocidas. En el caso de los nodos de calle, la variable evaluada es el máximo tirante alcanzado (Figura 4.5), mientras que para los nodos de unión entre conducciones, se considera la relación entre el tirante máximo alcanzado y el tirante a sección llena (Figura 4.6).

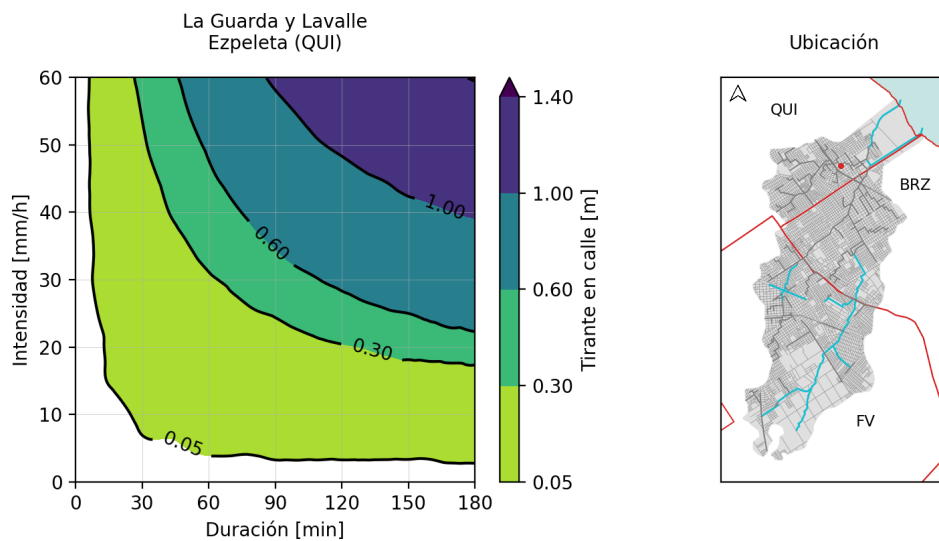


Figura 4.5: Ejemplo de gráfico intensidad-duración. Variable: altura de agua en calle.

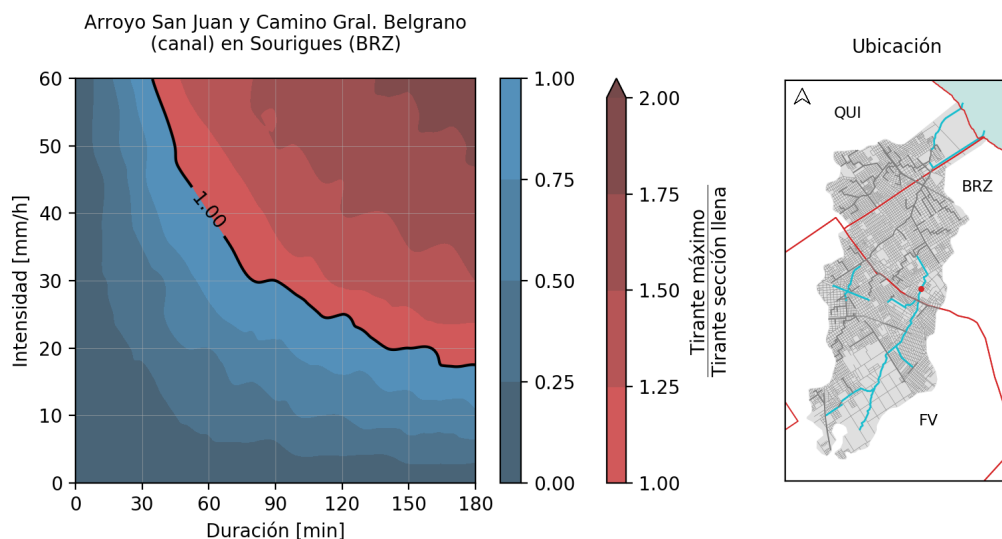


Figura 4.6: Ejemplo de gráfico intensidad-duración. Variable: relación tirante máximo y tirante a sección llena.

En estos gráficos queda plasmado que, frente a eventos de igual precipitación acumulada total, son las lluvias de mayor intensidad las que exigen mayor capacidad de conducción. Se ejemplifica a partir de la Figura 4.7 donde en color blanco fueron superpuestas isóneas de precipitación acumulada. Se observa que para eventos intensos, la capacidad de la conducción es alcanzada para una precipitación acumulada del orden de 40 mm, mientras que si los eventos son prolongados en el tiempo, ese valor asciende a 60 mm.

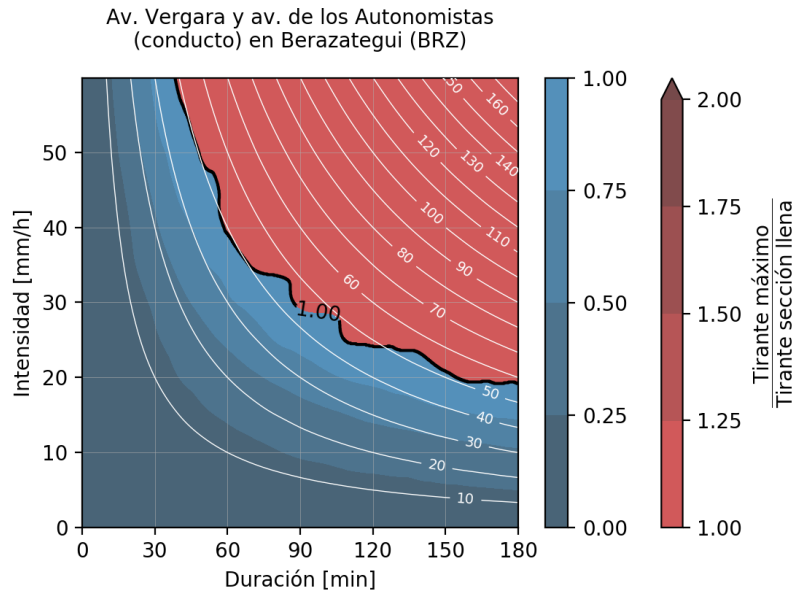


Figura 4.7: Gráfico intensidad-duración con isótopas de precipitación acumulada superpuestas en color blanco (valores expresados en mm).

#### 4.1.4. Gráfico intensidad-duración resumen

Al igual que los gráficos presentados en el apartado anterior, posee tres dimensiones: duración en el eje  $x$ , intensidad en el eje  $y$  y una tercer variable representada, en este caso, por una escala monocromática (Figura 4.8). La variable en estudio es el porcentaje de la longitud total del sistema de drenaje (conductos y canales) que ve superada su capacidad ante un evento de duración e intensidad determinadas, por lo que el gráfico ya no está asociado a un único punto, sino que es representativo de la situación de toda la cuenca. Se lo considera entonces una gráfico resumen porque sintetiza los resultados de las 216 simulaciones y además contiene información de todos los conductos y canales modelados.

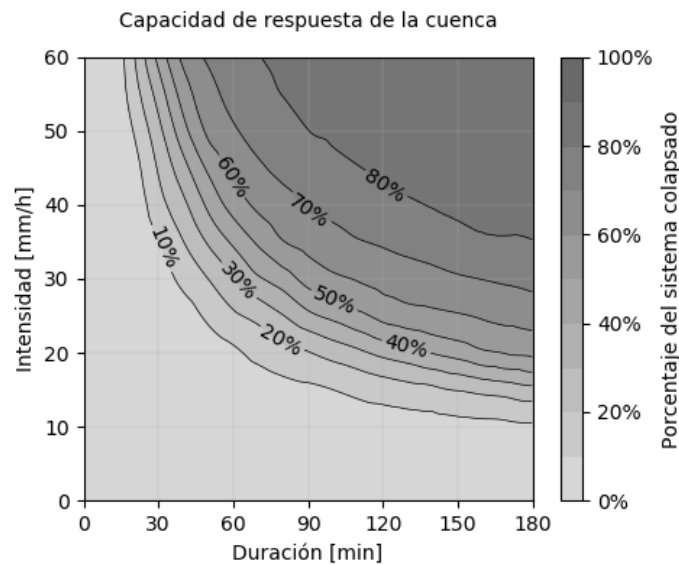


Figura 4.8: Gráfico intensidad-duración resumen.

## 4.2. Escenarios plausibles

### 4.2.1. Inundación La Plata - 2013

Se evaluó la respuesta del sistema de drenaje frente a un escenario meteorológico extremo, simulando sobre la cuenca el evento de precipitación extraordinario ocurrido en La Plata en 2013. El 2 de abril de ese año el pluviógrafo del Observatorio Astronómico de la Universidad Nacional de La Plata (UNLP) registró casi 400 mm en 20 horas, de los cuales 300 mm precipitaron en un lapso de 3 horas [UNLP, 2013]. Las inundaciones dejaron un saldo de al menos 89 fatalidades y pérdidas económicas estimadas en 800 millones de dólares [Télam, 2019].

Para la simulación de la tormenta se consideró la serie registrada mencionada (Figura 4.9) y un mapa de decaimiento espacial generado a partir de registros obtenidos de un conjunto de estaciones oficiales y no oficiales, elaborado por el LHA-INA [INA, 2013].

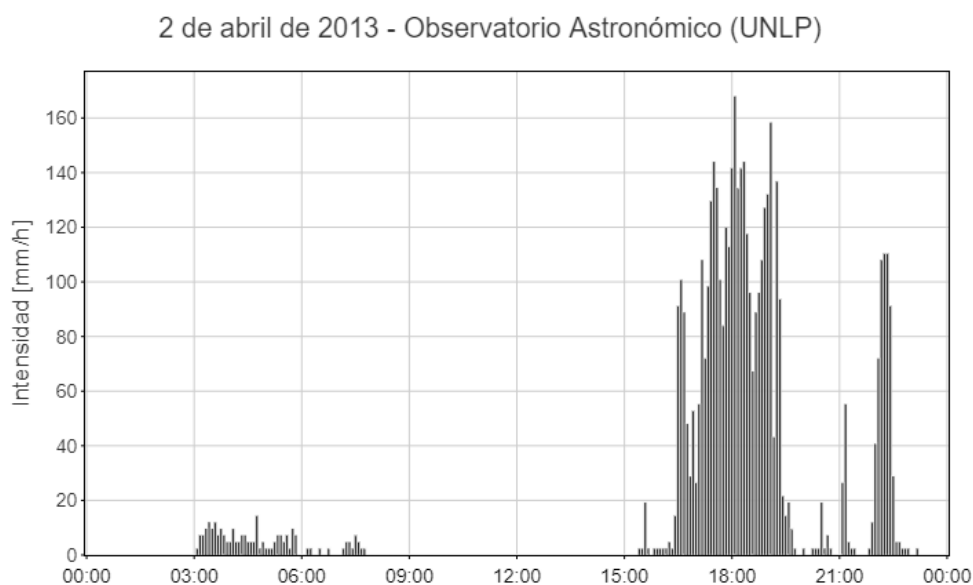


Figura 4.9: Hietograma del 2 de abril de 2013. Observatorio Astronómico (UNLP).

### 4.2.2. Aumento de impermeabilidad

El proceso de urbanización es una tendencia global. En 2018 el 92 % de la población en Argentina se concentraba en áreas urbanas, ubicándose dentro de los 20 países más urbanizados a nivel mundial. Las proyecciones indican que en 2050 ese valor alcanzará el 95 % [UN, 2018].

La impermeabilización del suelo y la simplificación de la red de drenaje asociadas a la urbanización impactan fuertemente en los procesos hidrológicos que tienen lugar en la cuenca: disminuye la infiltración mientras aumentan los volúmenes de escorrentía, la magnitud de los picos de caudal y la velocidad de respuesta de la cuenca [Fletcher et al., 2013].

En la Figura 4.10 se ilustra el avance de la mancha urbana dentro de los límites de la cuenca en estudio. La figura fue elaborada a partir de imágenes Landsat por el método de clasificación supervisada. Se observa un incremento sostenido en las últimas tres décadas en la proporción de área urbanizada, destacándose el intervalo entre los años 1990 y 1995 como el periodo de mayor crecimiento (Figura 4.11). En la porción de la cuenca perteneciente al partido de Berazategui el área urbanizada representa casi



el 90 % del área total, por lo que se encuentra cerca del límite de máxima expansión. En cambio, en Florencio Varela la cobertura urbana apenas supera el 60 % (posee una importante zona rural) por lo que presenta posibilidades de avance de la frontera urbana. Por su parte, la zona urbana perteneciente a Quilmes muestra una menor tasa de crecimiento en los últimos 10 años en comparación con los otros dos partidos y tiene la capacidad de crecer únicamente avanzando sobre la planicie costera del Río de La Plata.

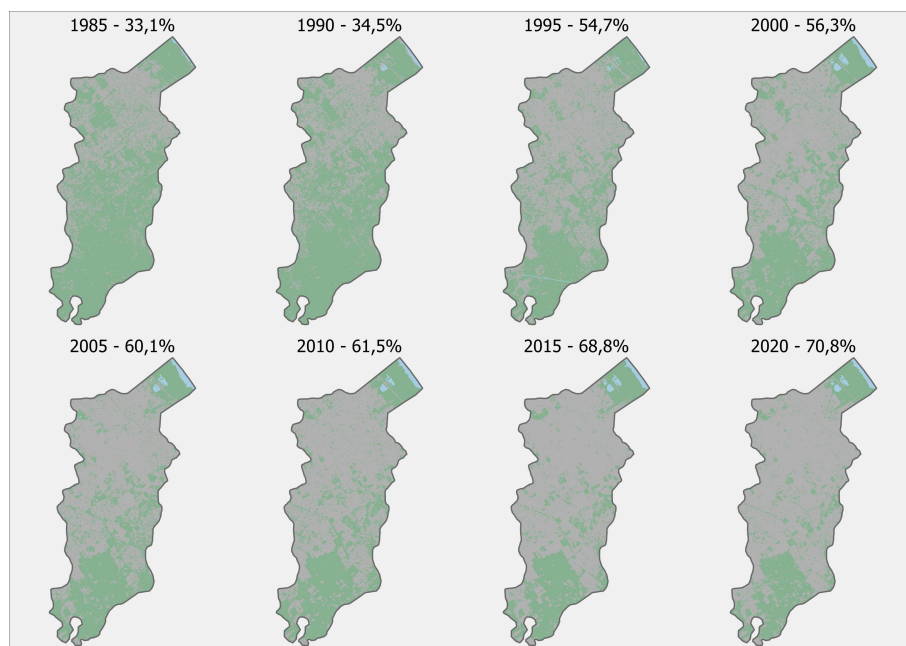


Figura 4.10: Avance de la mancha urbana.

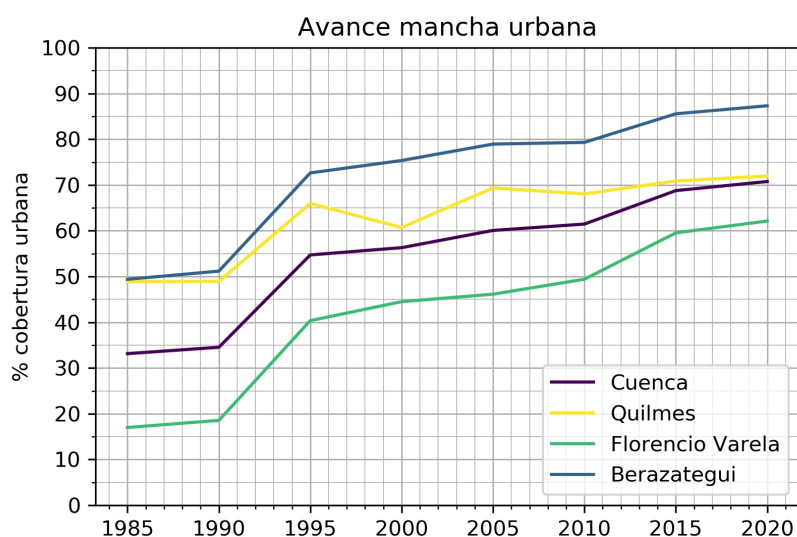


Figura 4.11: Avance de la mancha urbana por partidos.

Se evaluaron escenarios de expansión del área urbana en un 10 y un 20 % respecto de la extensión actual de la misma. En caso de mantenerse la tasa de crecimiento de los últimos 5 años, estos escenarios se materializarían en 2035 y 2050 respectivamente. Para simularlos se adecuó el modelo, modificando el porcentaje de impermeabilidad de una porción de las subcuencas permeables ubicadas en la zona rural de la cuenca alta. Las subcuencas modificadas fueron seleccionadas de manera tal que la extensión del área urbana alcance el valor proyectado para cada escenario. En cada una de ellas se elevó el porcentaje de impermeabilidad desde 5 % (adoptado en el modelo para las cuencas permeables) hasta 58 % (valor observado en la zonas urbanizadas de la cuenca alta). El evento elegido para realizar estos ensayos fue el del 11 de octubre de 2019, utilizado anteriormente en la validación del modelo.

## Capítulo 5

# Resultados obtenidos

Para caracterizar la capacidad de respuesta de la cuenca, se analizó en principio la respuesta del modelo frente a eventos ordinarios. Se consideraron como eventos ordinarios de referencia, los eventos registrados en 2019 utilizados en este trabajo para la calibración y validación del modelo. Sobre estas series de PMA sobre la cuenca, se trabajó con las ventanas temporales más desfavorables asociadas a duraciones de media, una y tres horas. A su vez también se analizaron eventos de periodo de recurrencia de 2 años (Tabla 5.1). En ese caso, las intensidades se estimaron con la parametrización de la curva Intensidad - Duración - Frecuencia (IDF) elaborada a partir de registros de la estación meteorológica Villa Ortuzar, adoptada por la Autoridad de Cuenca Matanza Riachuelo (ACUMAR) en sus estudios [ACUMAR, 2015].

| Duración | Eventos ordinarios 2019<br>Ventana más desfavorable | Tormenta de 2 años de recurrencia<br>$I = 0,3300D^{-0,600}$ |
|----------|-----------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------|
| ½ hora   | 31,6 mm/h                                           | 50,0 mm/h                                                   |
| 1 hora   | 20,9 mm/h                                           | 33,0 mm/h                                                   |
| 3 horas  | 10,5 mm/h                                           | 17,1 mm/h                                                   |

Tabla 5.1: Duraciones e intensidades para eventos ordinarios y de 2 años de recurrencia.

En cuanto a la situación superficial de la cuenca (Tabla 5.2), para los eventos ordinarios prácticamente no se observan problemas de ingreso de agua en las casas. Si se analizan los resultados para los eventos de dos años de periodo de recurrencia, la situación ya no es tan favorable: en algunas zonas el agua llega a entrar en los domicilios, e incluso en determinados sectores aislados el agua alcanza la altura de superación de muebles.

Mirando lo que sucede en el sistema de drenaje (Tabla 5.3), unos pocos ramales de la red de conductos pluviales se ven afectados por los eventos caracterizados como ordinarios, mientras que, si se analizan los eventos de 2 años de recurrencia, la proporción afectada es mayor e incluso se ve superada la capacidad en algunos tramos de los entubados principales.

De este primer análisis se desprende que la respuesta de la cuenca es adecuada frente a eventos ordinarios y comienza a presentar algunos inconvenientes para eventos de una recurrencia asociada de 2 años.

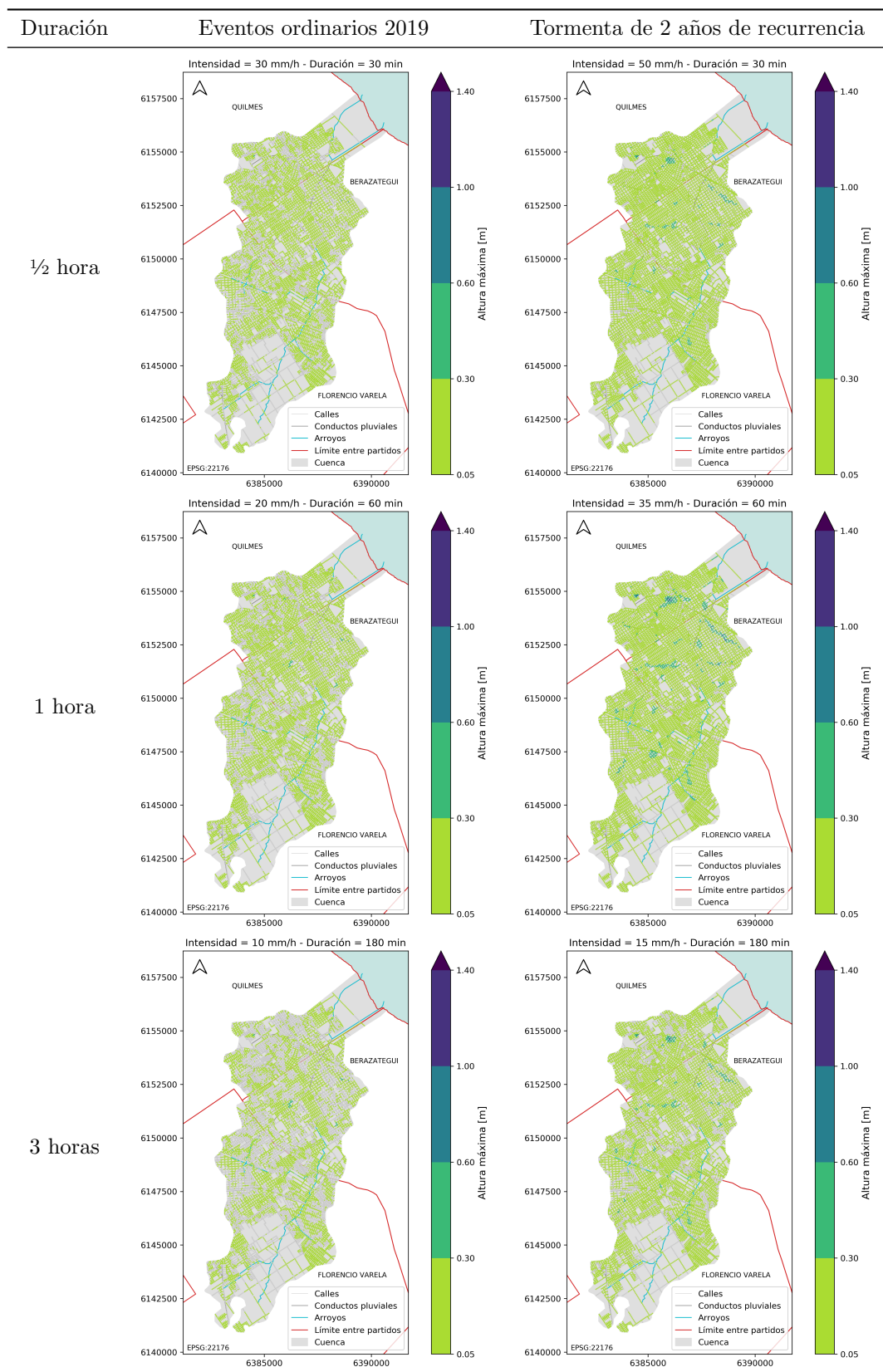


Tabla 5.2: Situación superficial para eventos ordinarios y de 2 años de recurrencia.

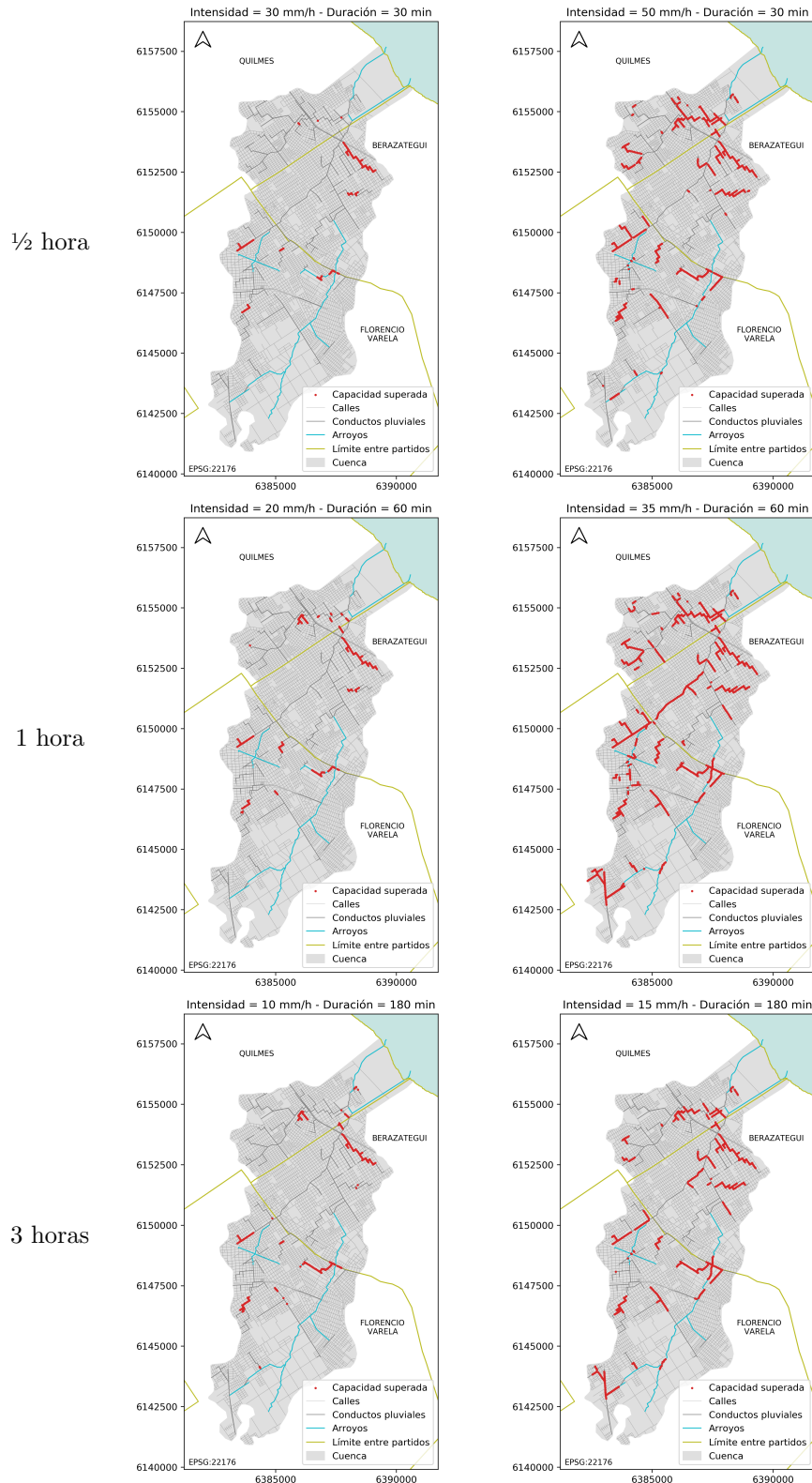


Tabla 5.3: Situación del sistema de desagües pluviales para eventos ordinarios y de 2 años de recurrencia.

Por otro lado, considerando eventos de hasta 3 horas de intensidad constante y uniforme sobre toda la cuenca y condiciones de mantenimiento óptimas de la red pluvial, se observa que:

- Frente a precipitaciones de hasta 15 mm/h se ven afectados principalmente conductos menores (Figura 5.1).
- A partir de intensidades del orden de 20 mm/h extensos tramos de los arroyos, ya sean entubados o a cielo abierto, ven superada su capacidad (Figura 5.2).

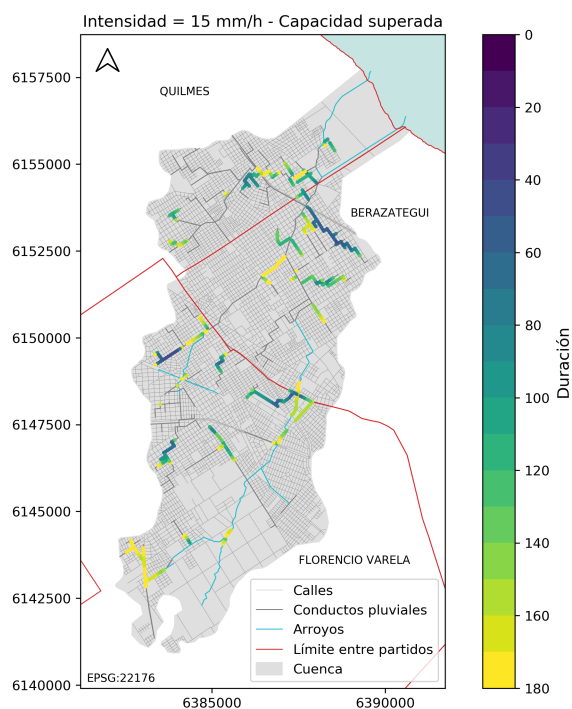


Figura 5.1: Mapa de duración hasta alcanzar la capacidad en conductos y canales, siendo intensidad = 15 mm/h.

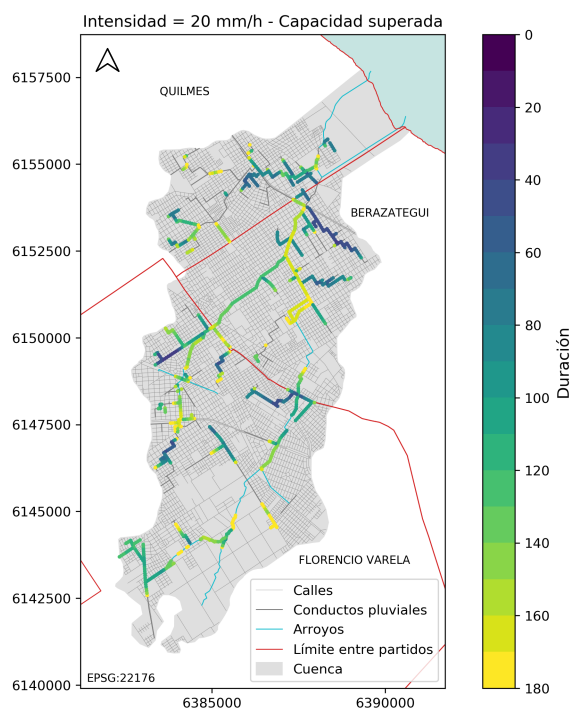


Figura 5.2: Mapa de duración hasta alcanzar la capacidad en conductos y canales, siendo intensidad = 20 mm/h.

- A partir de intensidades del orden de 25 mm/h, se alcanza la altura de superación de muebles en distintas zonas de la cuenca, umbral que al ser atravesado se traduce en pérdidas materiales importantes y en la necesidad de evacuar hogares (Figura 5.3).
- A partir de intensidades del orden de 30 mm/h, ya en algunas zonas el tirante supera 1 m de altura, pudiendo ocasionar el ahogamiento en niños (Figura 5.4).

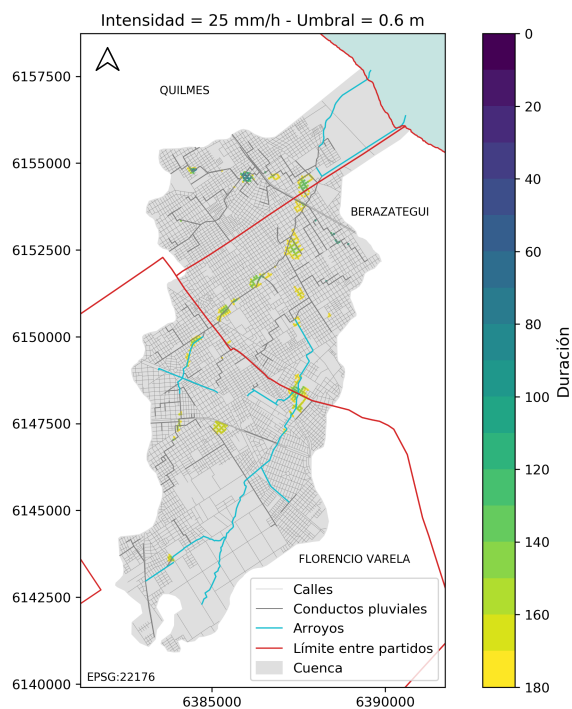


Figura 5.3: Mapa de duración hasta alcanzar la altura de superación de muebles, siendo intensidad = 25 mm/h.

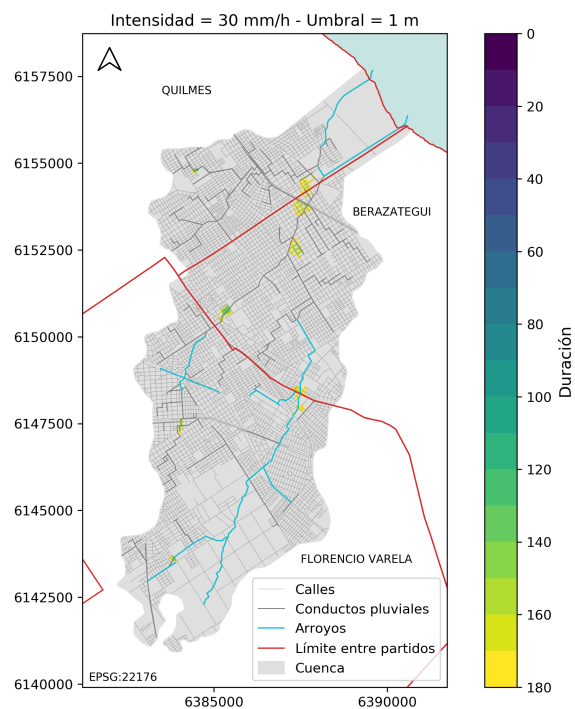


Figura 5.4: Mapa de duración hasta alcanzar la altura de riesgo de ahogamiento en niños, siendo intensidad = 30 mm/h.

Analizando los gráficos intensidad-duración-capacidad correspondientes a tramos seleccionados de conductos o canales distribuidos en todo el sistema de drenaje, se identifican curvas de similares características en los arroyos San Juan (Figuras 5.5, 5.6 y 5.7) y Jiménez (Figuras 5.8, 5.9, 5.10 y 5.11) aguas arriba de su confluencia (Figura 5.12).

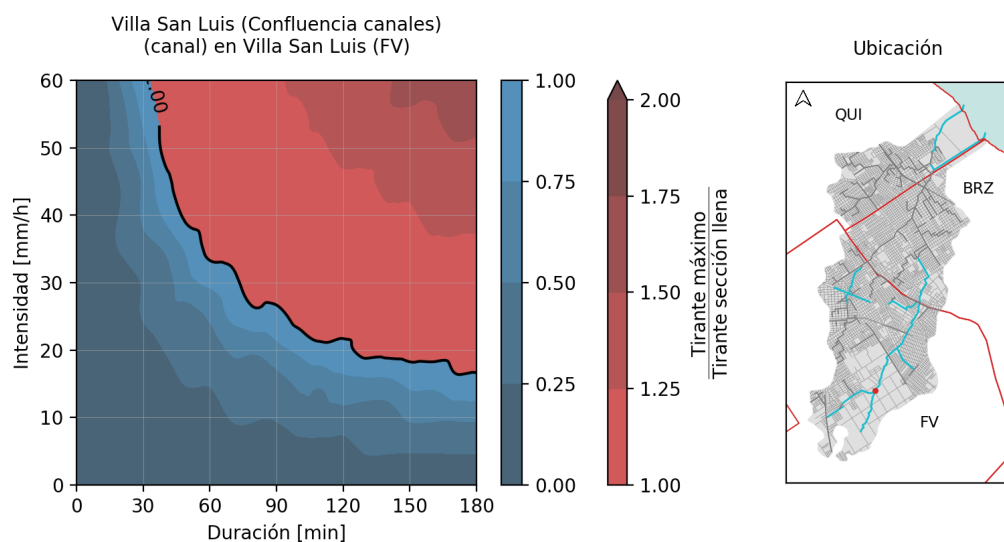


Figura 5.5: Gráfico intensidad-duración en un tramo a cielo abierto del arroyo San Juan.

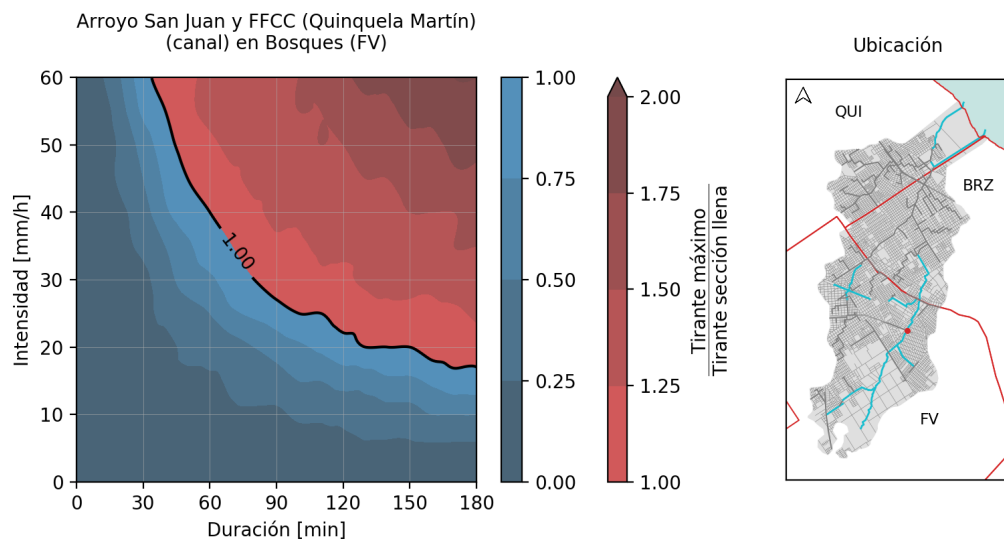


Figura 5.6: Gráfico intensidad-duración en un tramo a cielo abierto del arroyo San Juan.

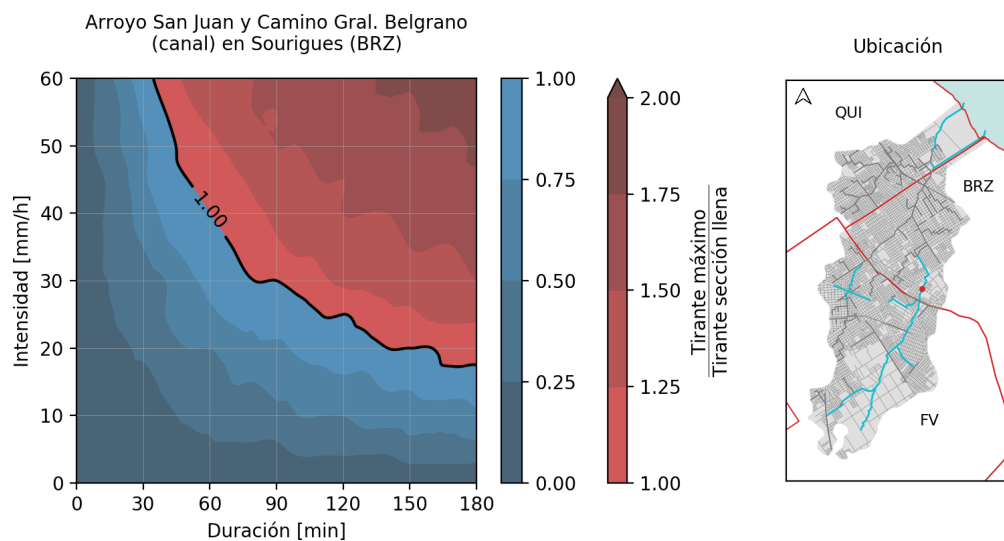


Figura 5.7: Gráfico intensidad-duración en un tramo a cielo abierto del arroyo San Juan.



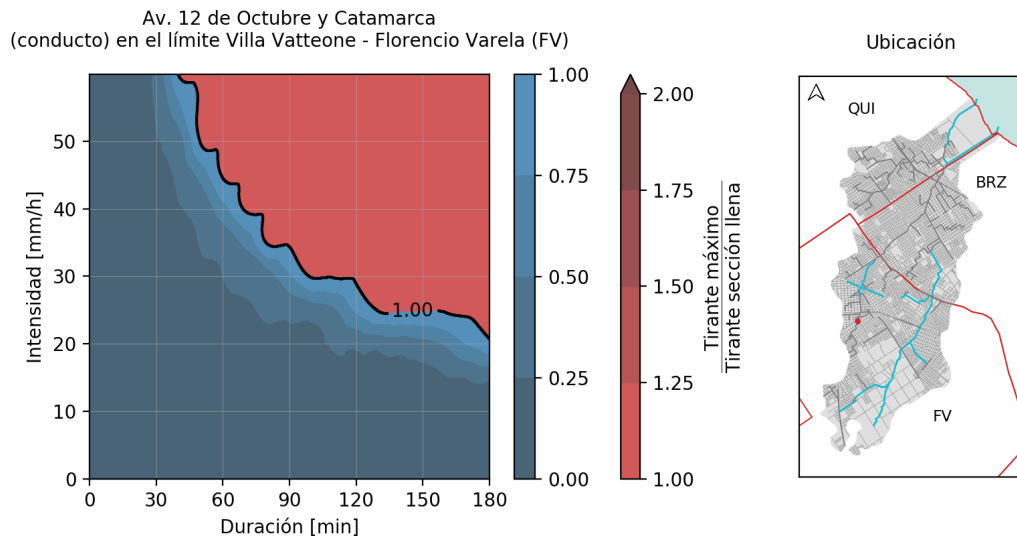


Figura 5.8: Gráfico intensidad-duración en un tramo entubado del arroyo Jiménez.

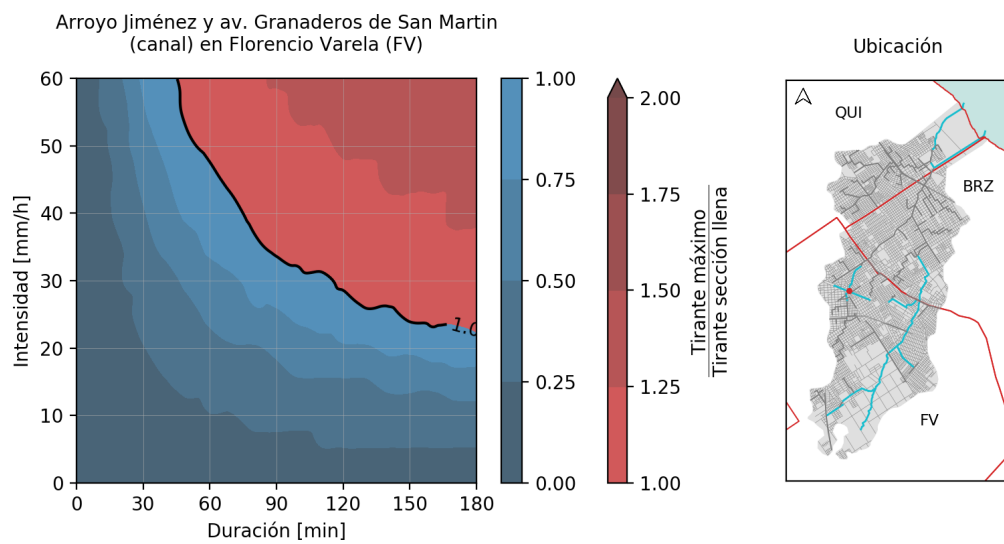


Figura 5.9: Gráfico intensidad-duración en un tramo a cielo abierto del arroyo Jiménez.

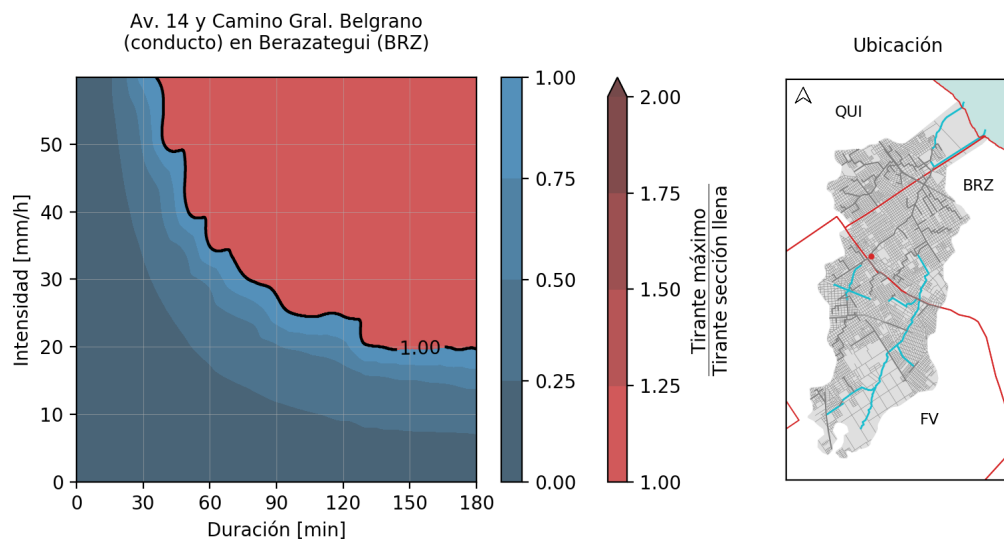


Figura 5.10: Gráfico intensidad-duración en un tramo entubado del arroyo Jiménez.

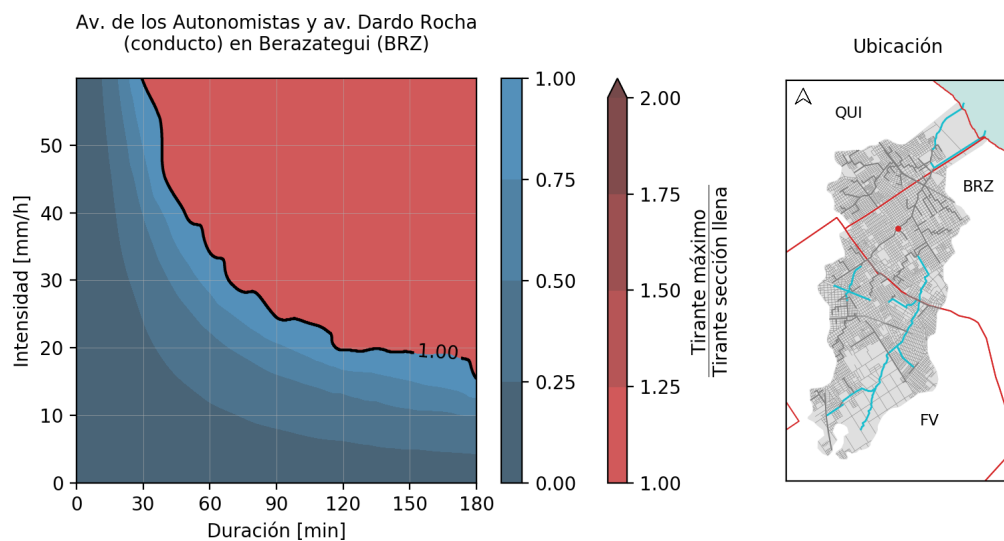


Figura 5.11: Gráfico intensidad-duración en un tramo entubado del arroyo Jiménez.

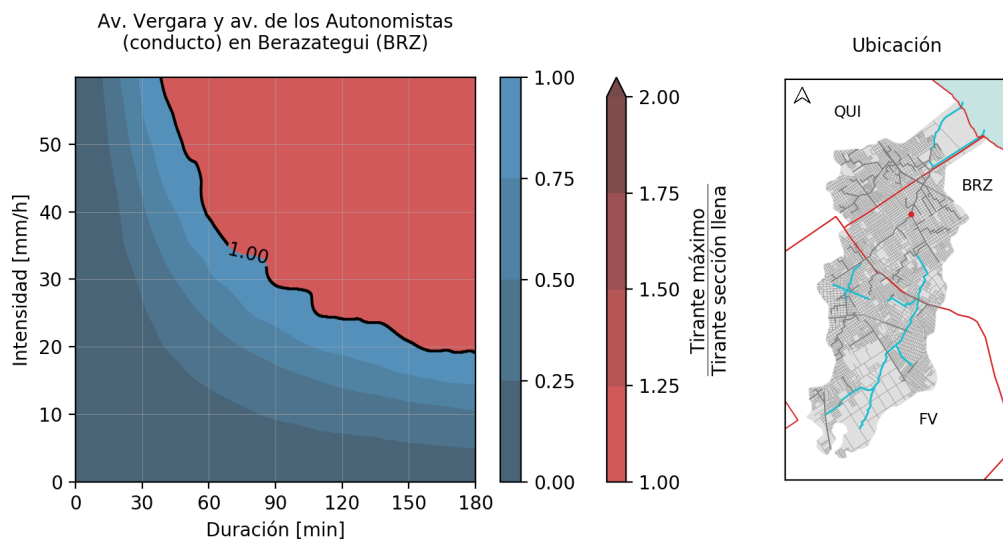


Figura 5.12: Gráfico intensidad-duración inmediatamente aguas abajo de la confluencia de los arroyos entubados San Juan y Jiménez.

En todos los gráficos intensidad-duración de las figuras anteriores se observa que para lluvias intensas, de hasta 60 mm/h, la capacidad es alcanzada cuando la duración se extiende más allá de media hora, y para tormentas largas, del orden de las tres horas, lo mismo ocurre cuando se supera un umbral de intensidad media del orden de los 20 mm/h. En algunos tramos este último umbral desciende por debajo de 15 mm/h, como es el caso del tramo que cruza a cielo abierto el predio de Bosques de Defensa y Justicia, donde se conoce que son frecuentes los anegamientos (Figura 5.13).

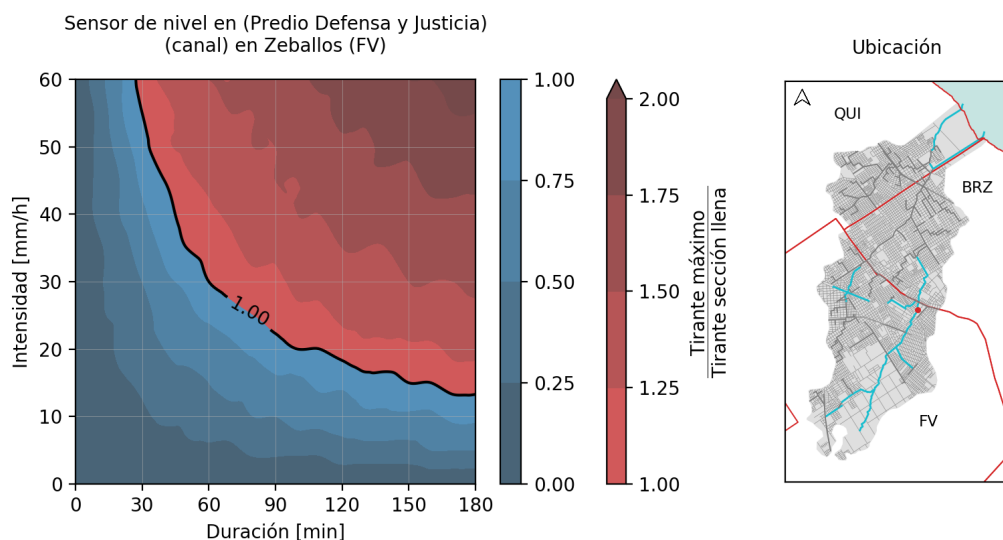


Figura 5.13: Gráfico intensidad-duración en el tramo del arroyo San Juan donde se encuentra ubicado el sensor de nivel.

Puede verse también, al igual que en la Figura 5.1, que los conductos de menor importancia son los primeros en ver afectada su capacidad. En el gráfico intensidad-duración correspondiente a, por ejemplo, el conducto de las calles Galli Mainini y Uruguay donde se encuentra ubicado el Hospital Mi Pueblo (establecimiento donde se ha registrado ingreso de agua en reiteradas ocasiones), se observa como el área

roja ocupa una mayor proporción (Figura 5.14) que en los gráficos presentados anteriormente.

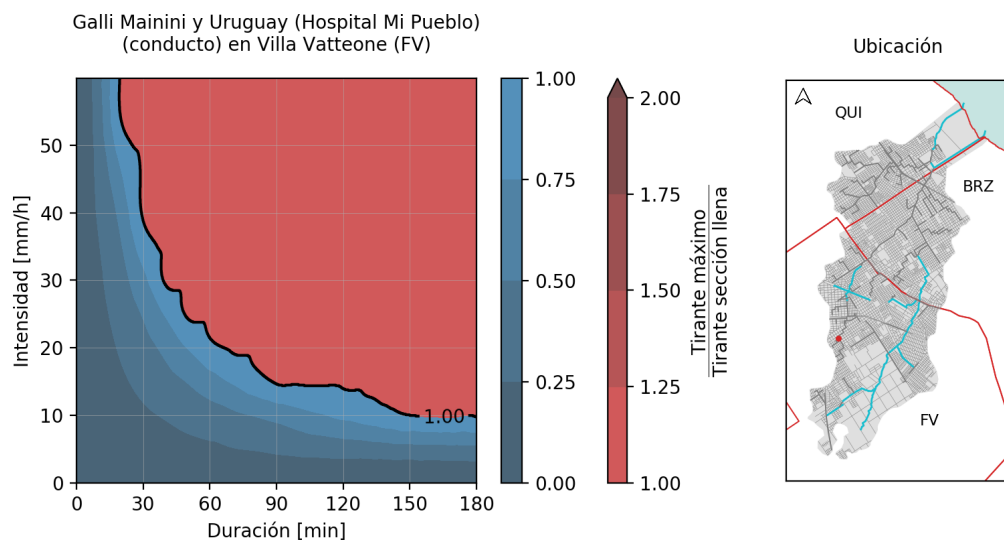


Figura 5.14: Gráfico intensidad-duración en el conducto ubicado en la cuadra del Hospital Mi Pueblo.

En contraposición, las conducciones de mayor sección, tanto el tramo final del entubado como el arroyo y el aliviador que desembocan en el Río de la Plata, cuentan con mejor capacidad de respuesta que el resto del sistema en general (Figuras 5.15 y 5.16) a pesar de ser las conducciones encargadas de recibir los mayores caudales.

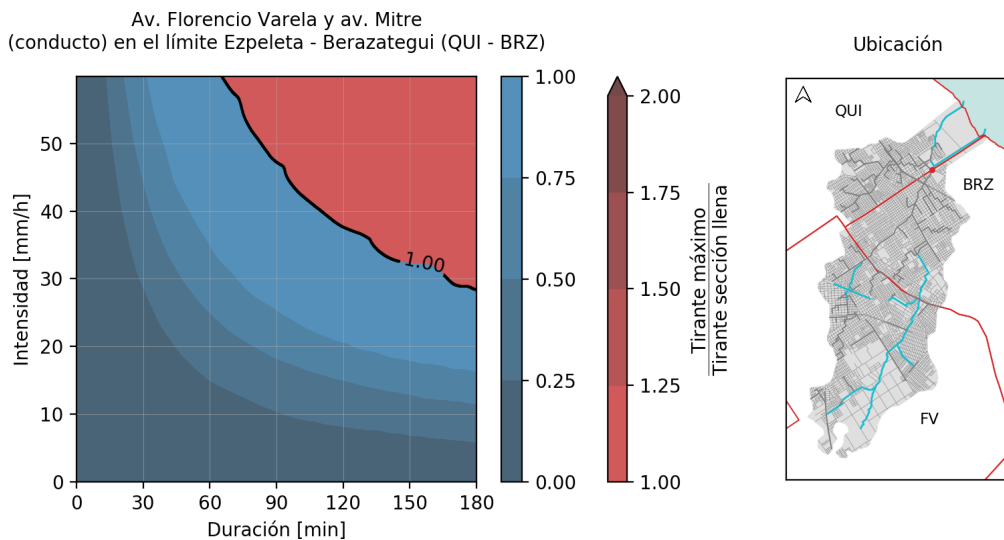


Figura 5.15: Gráfico intensidad-duración en el tramo final del entubamiento del arroyo Jiménez.

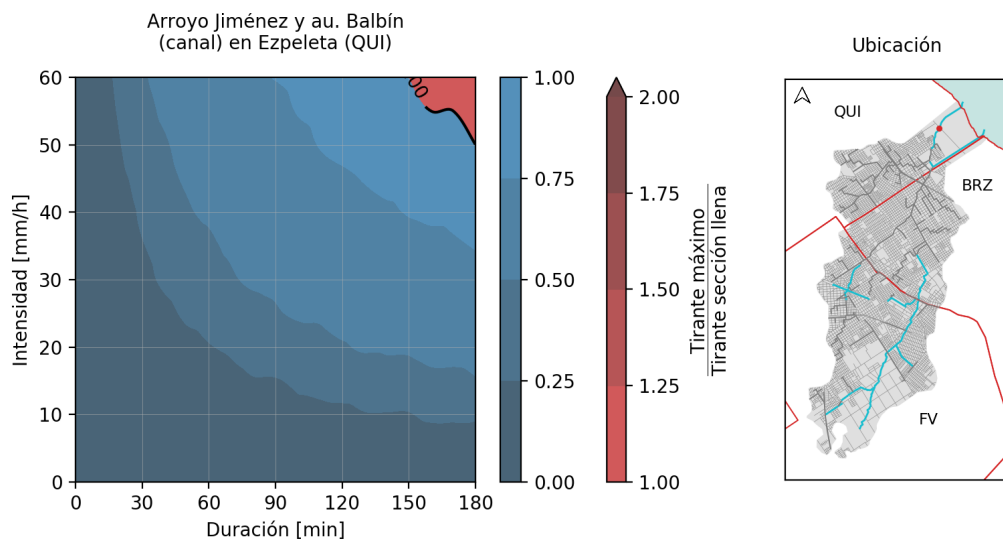


Figura 5.16: Gráfico intensidad-duración en el tramo final a cielo abierto del arroyo Jiménez.

Dejando atrás el análisis en conducciones particulares, se analiza el gráfico intensidad-duración resumen de la Figura 5.17. Asociadas a la isolínea de 10 % de sistema colapsado se pueden distinguir una asíntota vertical en 15 minutos y una asíntota horizontal en 10 mm/h. Esto indica que la situación del sistema de drenaje se encuentra bajo control si la duración de lluvias intensas se limita a 15 minutos, y en el caso de las tormentas largas, si la intensidad se mantiene por debajo de 10 mm/h. Otro punto de referencia perteneciente a esa curva está dado por eventos de una hora de duración e intensidad de 20 mm/h, para los cuales no deberían registrarse grandes inconvenientes en el drenaje. Si se considera como situación crítica el colapso del 50 % del sistema, la duración crítica para precipitaciones intensas es del orden de media hora y la intensidad crítica para tormentas prolongadas en el tiempo es 20 mm/h. En un caso intermedio, en eventos de una hora de duración la intensidad crítica es cercana a 40 mm/h.

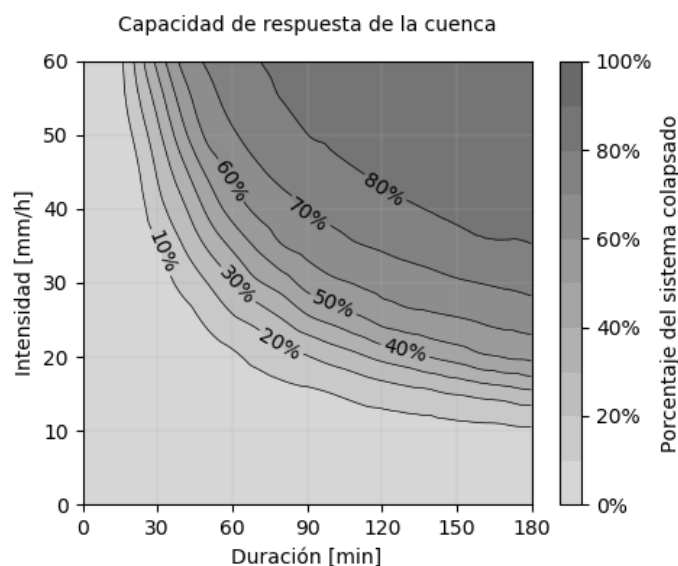


Figura 5.17: Gráfico intensidad-duración resumen.

A su vez, si sobre este gráfico se superponen las curvas IDF (Figura 5.17), se puede tener una idea

del grado y la frecuencia en que falla el sistema. En la Tabla 5.4 se sintetiza la información resultante. Estos gráficos permiten además determinar para un determinado periodo de recurrencia, si el grado de afectación es mayor debido a precipitaciones intensas o a precipitaciones prolongadas, y de esa manera poder identificar qué tipo de medidas son más eficaces en cada caso para mejorar la respuesta del sistema. Por ejemplo, en el caso de la curva de 2 años de periodo de recurrencia, se puede ver que el grado de afectación no es homogéneo. Cuando las lluvias son intensas, el porcentaje del sistema colapsado no alcanza el 30 %, mientras que para lluvias de más de 90 minutos ese valor se encuentra por encima del 40 %.

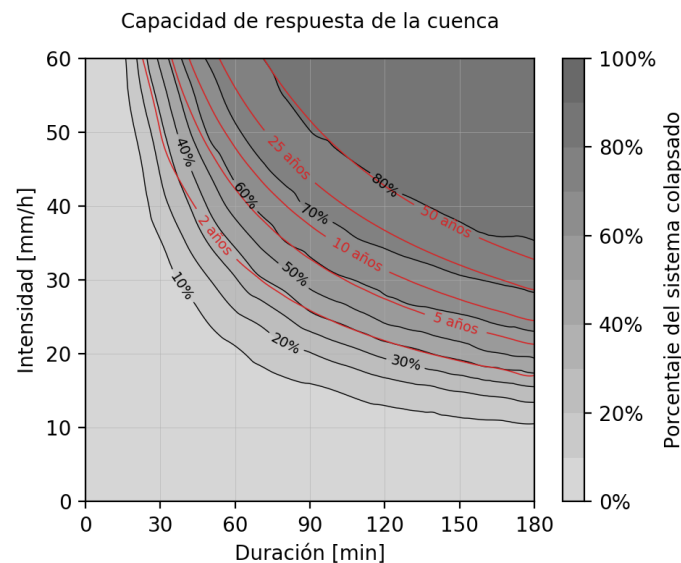


Figura 5.18: Gráfico intensidad-duración resumen y curvas IDF superpuestas en rojo.

| Periodo de recurrencia | Porcentaje del sistema colapsado |
|------------------------|----------------------------------|
| 2 años                 | 30 % - 40 %                      |
| 5 años                 | 50 % - 60 %                      |
| 10 años                | 65 %                             |
| 25 años                | 70 %                             |
| 50 años                | 80 %                             |

Tabla 5.4: Grado de afectación del sistema asociado a distintos periodos de recurrencia.

Se analizó la capacidad de respuesta por separado de canales y conductos (Figuras 5.19 y 5.20). Se observa que la situación de las conducciones cerradas es más crítica que la de los canales. La saturación de los conductos comienza a suceder a intensidades y duraciones menores, y el gradiente del gráfico es más pronunciado (menor distancia entre curvas).

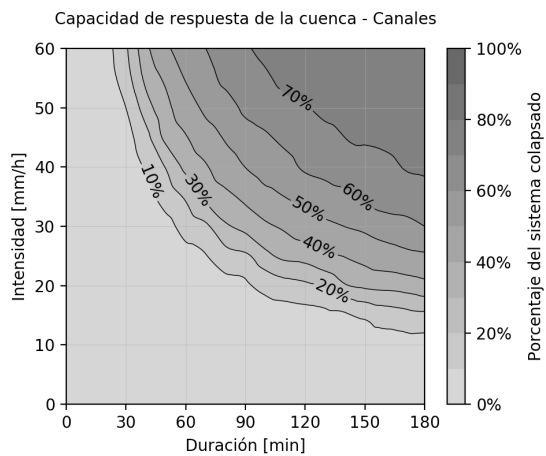


Figura 5.19: Gráfico intensidad-duración resumen asociado a la situación de los canales.

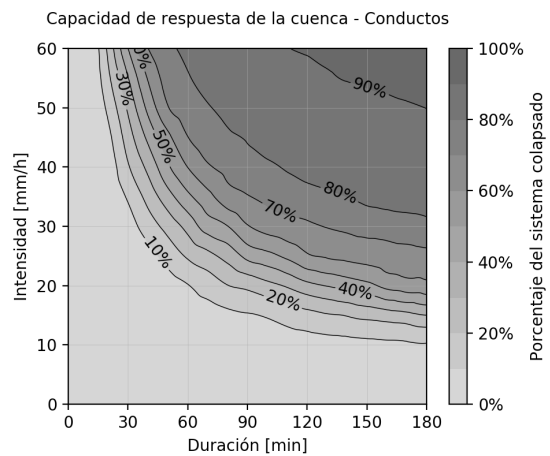


Figura 5.20: Gráfico intensidad-duración resumen asociado a la situación de los conductos.

En cuanto al comportamiento de la cuenca frente a eventos extraordinarios, en las Figuras 5.21 y 5.22 se presentan los resultados de la simulación del evento de precipitación que provocó la inundación de La Plata en 2013. Como era esperable, el sistema de desagües pluviales se presenta colapsado prácticamente en su totalidad. Los resultados de la modelación muestran que en más de la mitad de la superficie de la cuenca, el tirante en las calles supera los 30 cm pudiendo ingresar agua en las casas. A su vez, señalan que sobre una extensión del orden de 1000 ha el nivel de agua se encuentra por encima del umbral a partir del cual se considera que existe riesgo de ahogamiento de personas adultas.

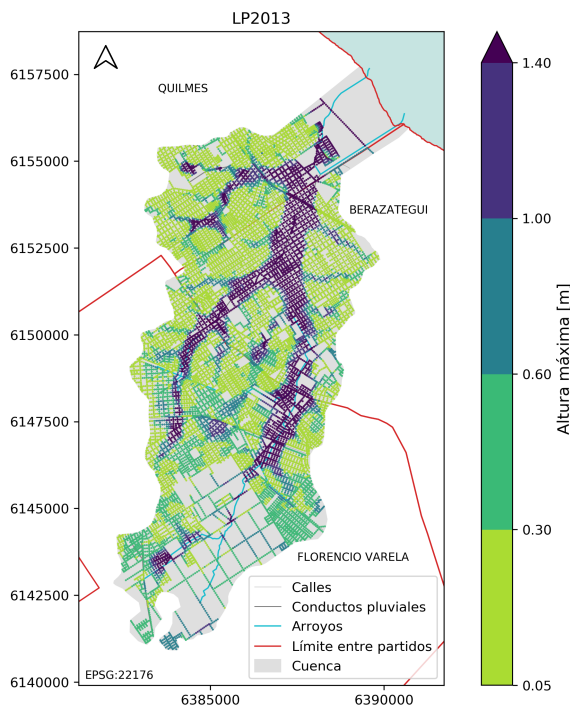


Figura 5.21: Situación superficial para el evento de La Plata - 2013.

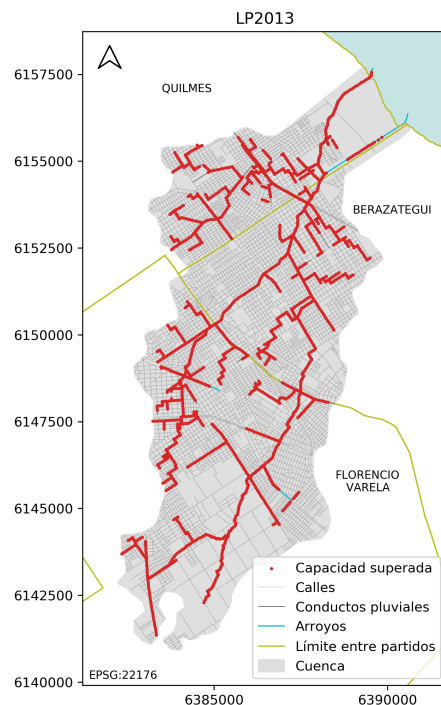


Figura 5.22: Situación del sistema de desagües pluviales para el evento de La Plata - 2013.

En la Figura 5.23 se muestra la evolución temporal de la situación del sistema de drenaje y el hietograma correspondiente. El porcentaje de sistema colapsado llega a superar el 90 % y durante más de 9 horas se encuentra por encima del 50 %. A su vez, desde el cese de las precipitaciones hasta el momento en que se restablece la situación del sistema transcurre un periodo del orden de 12 horas.

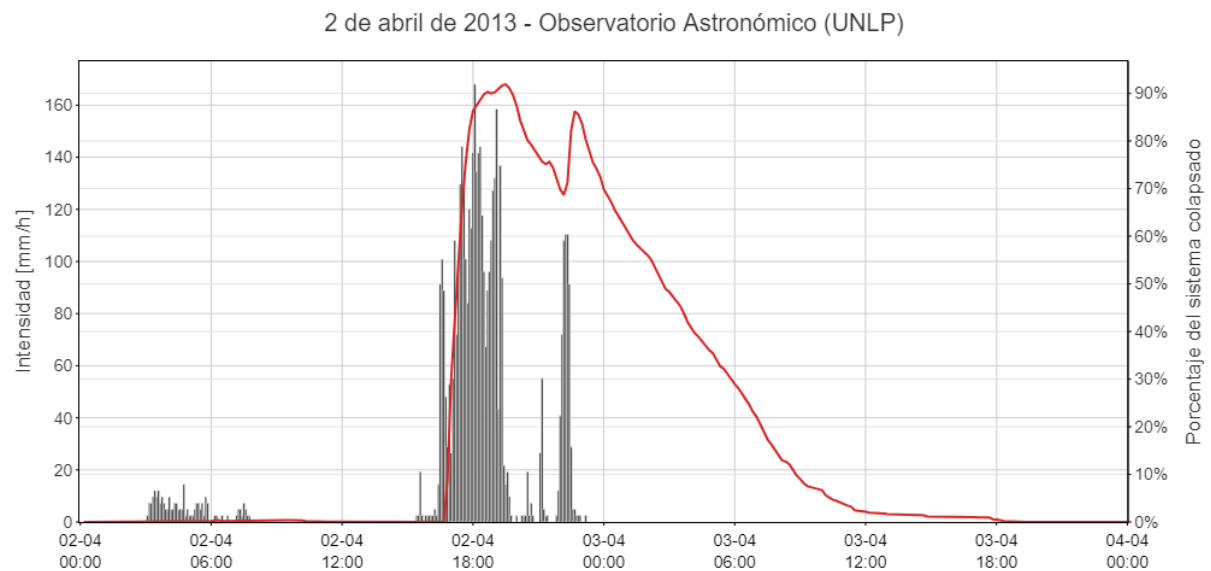


Figura 5.23: Hietograma y evolución del porcentaje de sistema de drenaje colapsado, correspondientes a la simulación del evento de La Plata (2013).

Por último, se presentan los resultados de la simulación de escenarios de expansión del área urbana, evaluados con el evento del 11 de octubre de 2019. Se observa un marcado aumento de la escorrentía superficial proporcional al aumento de impermeabilidad y una disminución no tan evidente del volumen infiltrado (Tabla 5.5). Estos cambios se reflejan en la cuenca alta, con la aparición de nuevas áreas afectadas en la zona rural, y con desplazamientos de no más de unos cientos de metros, de los límites de algunas áreas que ya se veían afectadas en el escenario actual (Figuras 5.24 y 5.25).

|                              | Escenario actual | Escenario +10 % | Escenario +20 % |
|------------------------------|------------------|-----------------|-----------------|
| Precipitación [mm]           | 114,3            | 114,3           | 114,3           |
| Infiltración [mm]            | 70,7             | 69,5 (-1,7 %)   | 68,3 (-3,4 %)   |
| Escorrentía superficial [mm] | 43,1             | 44,2 (+7,3 %)   | 45,4 (+15,2 %)  |

Tabla 5.5: Principales componentes del balance hídrico para la comparación de escenarios de aumento de impermeabilidad.



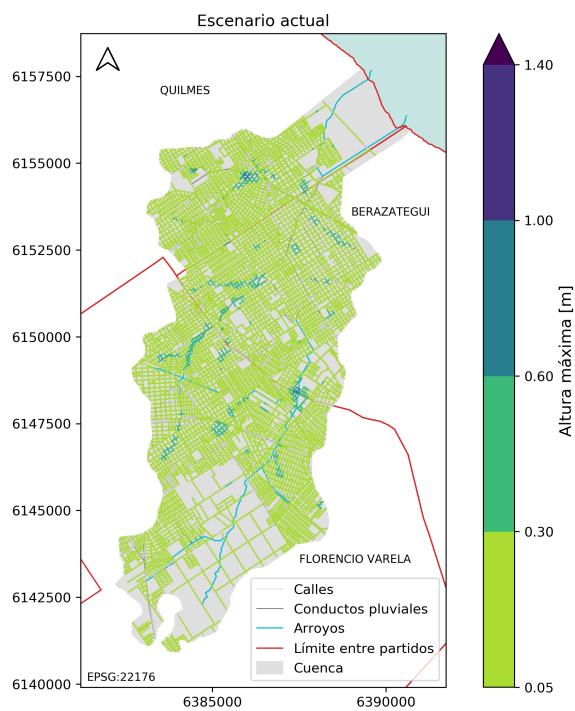


Figura 5.24: Situación superficial en escenario actual.

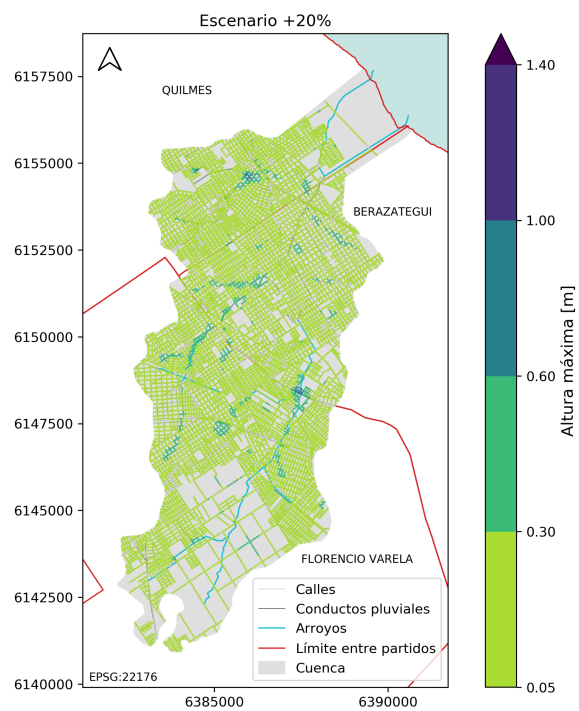


Figura 5.25: Situación superficial en escenario +20 %.

## Capítulo 6

# Conclusiones

Se consiguió generar un modelo hidráulico-hidrológico de alta resolución robusto, más allá de las limitaciones al momento de la calibración y validación debidas a falta de información pluviométrica al Este de la cuenca. Para ello fue fundamental contar con datos de distinta índole provenientes de diferentes fuentes, en cantidad y calidad adecuadas. Eso fue posible gracias a la disponibilidad de datos abiertos y a la cooperación de los municipios involucrados al otorgar información indispensable para el desarrollo de este trabajo. Entre los datos abiertos de mayor valor, se destacan el MDE de 5 m de resolución generado a partir de vuelos aerofotogramétricos, descargable desde la web del IGN y la base pública de datos hidrometeorológicos perteneciente a la Subgerencia de Sistemas de Información y Alerta Hidrológico (SIyAH) del INA. Es importante recalcar el valor de contar con sensores de nivel en los arroyos para poder llevar a cabo la calibración y validación de este tipo de modelos. A su vez, resaltar el aporte valiosísimo de las denuncias de los ciudadanos afectados, ya sea mediante reclamos por vías oficiales, como descargos en redes sociales. Esta información una vez georreferenciada, complementa y suple la falta de mediciones físicas. En este mismo sentido, es importante alentar e impulsar el desarrollo de proyectos colaborativos para la recopilación de información de todo tipo, que permiten obtener datos con un grado de detalle que de otra forma sería muy difícil o imposible de conseguir. Por otra parte, este modelo fue generado prácticamente en su totalidad mediante software libre y de código abierto, lo que permite que otros equipos de trabajo puedan replicar esta metodología en otras cuencas urbanas. Otra ventaja de la metodología utilizada es que permite que el modelo sea actualizado fácilmente ante cambios en la cuenca o a mejoras en la información disponible. Esta misma característica lo vuelve útil para en futuros proyectos, evaluar distintas alternativas de medidas estructurales y no estructurales.

En cuanto a la caracterización de la capacidad de respuesta de la cuenca frente a eventos de precipitación, los resultados presentados en el capítulo anterior confirman que el sistema de drenaje responde adecuadamente a tormentas ordinarias y comienza a presentar inconvenientes frente a eventos de dos años de recurrencia (30 a 40 % del sistema colapsado). Los arroyos Jiménez superior y San Juan, ya sea en sus tramos entubados o a cielo abierto, responden de manera similar frente a distintos tipos de eventos: para lluvias intensas, de hasta 60 mm/h, la capacidad es alcanzada cuando el evento se extiende por más de media hora, y para tormentas prolongadas, del orden de las 3 horas, la capacidad se supera cuando se atraviesa un umbral de intensidad media del orden de los 20 mm/h. Los resultados también muestran que son los conductos secundarios de menor sección los primeros y más afectados por las precipitaciones, mientras que las conducciones de mayor magnitud de la cuenca baja, encargadas de conducir el volumen de escorrentía generado a lo largo de toda la cuenca, son las que mejor respuesta presentan frente a eventos severos. Un panorama general de la cuenca se pudo plasmar en una única imagen con el gráfico intensidad-duración resumen (Figura 5.17). La información de las isolíneas consideradas de relevancia, correspondientes a 10 y 50 % del sistema colapsado, es resumida en la siguiente tabla:

|                                                             | Umbral de duración<br>(precipitaciones intensas) | Umbral de intensidad<br>(precipitaciones prolongadas) |
|-------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------|-------------------------------------------------------|
| <b>Isolínea 10 %:</b><br>Situación del sistema bajo control | 15 min                                           | 10 mm/h                                               |
| <b>Isolínea 50 %:</b><br>Situación del sistema crítica      | 30 min                                           | 20 mm/h                                               |

Tabla 6.1: Datos relevantes del gráfico intensidad-duración resumen.

Posibles escenarios de aumento de impermeabilidad debidos al avance de la frontera urbana no modifican sustancialmente el comportamiento de la cuenca pero pueden agravar la situación en determinadas zonas frente a eventos de magnitud. Por otra parte, eventos extraordinarios como el ocurrido en la ciudad de La Plata en 2013, colapsan totalmente el sistema. En estos casos las obras estructurales no son suficientes y es necesario recurrir a medidas no estructurales dirigidas a reducir los impactos, como puede ser un sistema de alerta temprana. Como paso a seguir en esa dirección, transformar este modelo en un modelo operativo puede brindar, frente a avisos a corto plazo de tormentas, información valiosa para que la población y los servicios vinculados a la protección civil estén preparados, de manera de disminuir la magnitud de las consecuencias. De todos modos, hasta dar ese paso, los productos presentados en los apartados 4.1.1, 4.1.2 y 4.1.3 pueden ser de gran utilidad. La finalidad de los mismos es transferir el conocimiento generado tanto a servicios vinculados a la protección civil como a tomadores de decisiones. En ese caso es importante contactar con los destinatarios para consultar sus necesidades y de acuerdo a ellas, realizar las adecuaciones necesarias para un mayor provecho de los productos, ya sea respecto a la información mostrada o bien, al formato en que la reciben. Respecto a este último punto, los productos pueden compartirse de manera interactiva y online para facilitar la visualización y socialización de la información (Figura 6.1).

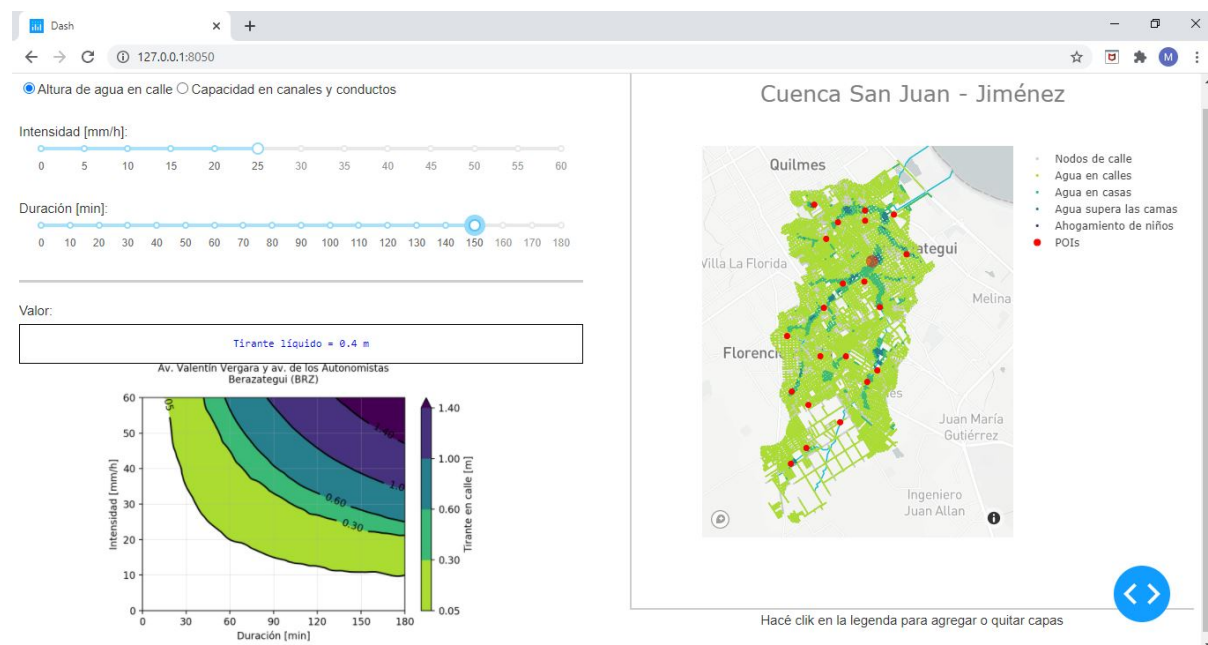


Figura 6.1: Tablero interactivo para visualización de productos. Panel superior izquierdo: selección de variable, intensidad y duración. Panel derecho: variable representada sobre mapa de la cuenca y puntos de interés (POIs) seleccionables para los cuales están disponibles los gráficos ID (panel inferior izquierdo).

Dentro de las conclusiones también se pueden incluir conceptos ya afianzados dentro de la hidrología urbana. Por un lado, la importancia de la planificación urbana, ya que las zonas que se ven principalmente afectadas son las aledañas a los arroyos donde el avance de la urbanización no respeta los límites de la planicie de inundación. Por el otro, la necesidad de concientizar a los ciudadanos de que el riesgo de inundación no se puede eliminar, ya que muchas veces obras estructurales como el entubado de un arroyo generan una falsa sensación de seguridad que indirectamente promueve el desarrollo de actividades encima de los mismos, agravando los impactos cuando el sistema colapsa.

Por último, se destaca el aporte importantísimo de estos modelos de alta resolución a una comprensión cada vez mayor de la dinámica de las cuencas urbanas, y su utilidad en distintos proyectos, ya sea para la creación de mapas de riesgo, la evaluación y comparación de medidas estructurales y no estructurales, el desarrollo de sistemas de alerta temprana, entre otras aplicaciones.

# Bibliografía

- [ACUMAR, 2015] ACUMAR (2015). Diagnóstico preliminar para el plan maestro de gestión de inundaciones y drenaje pluvial. *La Plata: UNLP, Facultad de Ingeniería, UIDET Hidromecánica*.
- [Brunner, 2014] Brunner, G. W. (2014). Combined 1D and 2D modeling with HEC-RAS. *US Army Corps of Engineers*.
- [Chow, 1994] Chow, V. T. (1994). *Hidráulica de canales abiertos*. (Trad. J. G. Saldarriaga) McGraw Hill.
- [Dalmati, 1962] Dalmati, D. (1962). Manual de hidráulica. *Centro de Estudiantes de Ingeniería de la Plata-CEILP*, 1.
- [Fletcher et al., 2013] Fletcher, T. D., Andrieu, H., and Hamel, P. (2013). Understanding, management and modelling of urban hydrology and its consequences for receiving waters: A state of the art. *Advances in water resources*, 51:261–279.
- [Gomez, 2007] Gomez, M. (2007). Curso de análisis y rehabilitación de redes de alcantarillado mediante el código SWMM 5.0. *Flumen. Universitat Politècnica de Catalunya. ETS Ingenieros de Caminos, Canales y Puertos de Barcelona. Departamento de Ingeniería Hidráulica, Marítima y Ambiental*.
- [Hutchinson et al., 2011] Hutchinson, M. F., Xu, T., Stein, J. A., et al. (2011). Recent progress in the ANUDEM elevation gridding procedure. *Geomorphometry*, 2011:19–22.
- [INA, 2013] INA (2013). Estudio de inundabilidad en el Gran Buenos Aires - Informe de diagnóstico de las cuencas de los arroyos Luján, Sarandí, Santo Domingo, Jiménez y Las Conchitas. *Informe LHA-335-01-12*.
- [Milanesi et al., 2015] Milanesi, L., Pilotti, M., and Ranzi, R. (2015). A conceptual model of people’s vulnerability to floods. *Water Resources Research*, 51(1):182–197.
- [Pereyra, 2004] Pereyra, F. X. (2004). Geología urbana del área metropolitana bonaerense (AMBA), Argentina y su influencia en la problemática ambiental.
- [Rawls et al., 1983] Rawls, W. J., Brakensiek, D. L., and Miller, N. (1983). Green-Ampt infiltration parameters from soils data. *Journal of hydraulic engineering*, 109(1):62–70.
- [Re et al., 2019] Re, M., Kazimierski, L. D., and Badano, N. D. (2019). High-resolution urban flood model for risk mitigation validated with records collected by the affected community. *Journal of Flood Risk Management*, 12(S2):e12524.
- [Rossman, 2015] Rossman, L. A. (2015). *Storm Water Management Model User’s Manual Version 5.1*. U.S. Environmental Protection Agency, Cincinnati, OH, USA.
- [Rossman and Huber, 2016] Rossman, L. A. and Huber, W. (2016). Storm water management model reference manual volume I-Hydrology (revised). *US Environmental Protection Agency: Cincinnati, OH, USA*.

- [Rossman and Huber, 2017] Rossman, L. A. and Huber, W. (2017). Storm water management model reference manual volume II—Hydraulics. *US Environmental Protection Agency, II (Mayo)*, 190.
- [Télam, 2019] Télam (2019). El juicio por la inundación de 2013 arrancó con una recusación al fiscal. URL: <https://www.telam.com.ar/notas/201903/338358-el-juicio-por-la-tragica-inundacion-de-2013-en-la-plata-arranco-con-una-recusacion-al-fiscal.html>. Visitado: 2020-12-04.
- [UN, 2018] UN (2018). Revision of world urbanization prospects. *Population Division of the UN Department of Economic and Social Affairs, UN, New York*. URL: <https://population.un.org/wup>.
- [UNLP, 2013] UNLP (2013). Estudio sobre la inundación ocurrida los días 2 y 3 de abril de 2013 en las ciudades de la plata, berisso y ensenada. *La Plata: UNLP, Facultad de Ingeniería, Departamento de Hidráulica*.
- [WMO, 2019] WMO (2019). *Long-term ambitions for the operational hydrological community*. Annex 1 to draft Resolution 5.3(1)/1. Eighteenth World Meteorological Congress (Cg-18), 3 to 14 June 2019, Geneva (Switzerland).