

SIMULACIÓN DE LA CANTIDAD Y CALIDAD DEL ESCURRIMIENTO PLUVIAL EN UN ÁREA URBANA DE MENDOZA

Jorge Maza; Hugo Loustaunau; Patricia López; Miguel Manzanera; Adrián Vargas A.;
Víctor Burgos; Verónica Benegas; Javier Zarategui; Carlos Rodríguez; Marta Nuñez;
Amilcar Álvarez; Luis Fornero

Instituto Nacional del Agua-Centro regional Andino

Belgrano 210 M5500FIF Mendoza. TeleFax: 0261 428 8251 E-mail: cra@ina.gov.ar

RESUMEN

Las inundaciones en áreas urbanas son reconocidas internacionalmente como un flagelo que afecta el normal desenvolvimiento de la población y consecuentemente impacta negativamente en la actividad económica. Además en la región cuyana se produce el caso de que los escurrimientos pluviales ya contaminados en la ciudad ingresan en la red de riego perjudicando a la producción agropecuaria.

Cuando se producen las intensas tormentas convectivas durante la temporada estival, se originan importantes escurrimientos en las áreas urbanas mendocinas, que en la mayoría de los casos exceden al sistema de drenaje pluvial (acequias) y por lo tanto se produce la conducción por las calles, transportando así una importante carga contaminante, que va hacia la zona agrícola a través de los cauces de riego que son receptores del drenaje urbano.

Las simulaciones realizadas en este estudio con el modelo PCSWMM dan resultados de cantidad y calidad del escurrimiento pluvial en diversos puntos de la cuenca urbana que distan de ser concluyentes para tomar cualquier tipo de decisiones estructurales y/o no-estructurales.

El proyecto tuvo carácter de demostrativo, y desde esa visión se puede rescatar que:

- las concentraciones de los contaminantes de las muestras provenientes de los eventos observados revelan información inédita para la región.
- las mediciones de calidad de agua de escurrimiento pluvial en los tres eventos observados son llamativas, dado que en algunos casos se determinaron valores de concentraciones que superan las normas del Departamento General de Irrigación de Mendoza.

Es necesario realizar campañas de medición sistemáticas para poder contar con información concluyente sobre esta problemática, y poder calibrar herramientas de simulación que luego pueden ser útiles para generar otros escenarios distintos del actual y así poder planificar.

Palabras claves: hidrología urbana – calidad del agua

INTRODUCCIÓN

Origen de los problemas de inundación urbana

En 1800, sólo alrededor del 2% de la población mundial, vivía en áreas urbanas y eso en sí era algo sorprendente. En tan sólo 200 años, la población urbana mundial ha pasado del 2% a casi el 50% de la población mundial. Los ejemplos más sorprendentes de urbanización en el mundo los constituyen las superciudades de 10 o más millones de personas. En 1975 sólo había cuatro, pero en el 2000 había 18 y, para el año 2015, las Naciones Unidas estiman que habrán 22, si bien mucho del crecimiento futuro no tendrá lugar en estas inmensas aglomeraciones de población, sino en las ciudades de pequeño y mediano tamaño en todo el mundo.

El crecimiento en las áreas urbanas se debe tanto al incremento en la inmigración a las ciudades como a la fecundidad de la población urbana. Mucho del desplazamiento a las ciudades tiene lugar por el deseo de las poblaciones rurales de aprovechar las ventajas que las zonas urbanas ofrecen, como mayores oportunidades de educación, atención a la salud y servicios como los recreativos. Los pobres en zonas urbanas tienen menos oportunidades de educación que quienes no son pobres, pero aún así tienen más oportunidades que la población rural.

La impermeabilidad del suelo produce en el ciclo hidrológico:

- Un alarmante aumento de los volúmenes de escorrentía
- Aumento de las velocidades de flujo
- Reducción de los tiempos de concentración
- Temperaturas más altas en cauces naturales
- Aumento de las inundaciones
- Mayores niveles de contaminación (por escorrentía urbana y por el aumento de la frecuencia, intensidad y toxicidad de las descargas de los sistemas de saneamiento convencionales en tiempo de lluvia)

PROBLEMÁTICA DE LA CONTAMINACIÓN DEL ESCURRIMIENTO PLUVIAL

Existe una interacción entre las poblaciones urbanas y su medio ambiente. La gente cambia el medio ambiente a través del consumo de alimentos, energía, agua y el uso de la tierra, y a su vez la contaminación ecológica urbana afecta la salud y la calidad de vida de las poblaciones en las ciudades.

Las personas que viven en zonas urbanas tienen un perfil de consumo muy diferente al de los residentes de áreas rurales. Por ejemplo, las poblaciones urbanas consumen mucha más comida, energía y bienes duraderos que las poblaciones rurales.

El consumo urbano de energía contribuye a crear núcleos de calor que pueden cambiar el perfil meteorológico local en las zonas hacia donde sopla el viento después de pasar por las ciudades. La combinación del incremento del consumo de energía y la diferencia de radiación significa que las ciudades son más calientes que las áreas rurales (entre 0,6°C y 1,3°C) y estos núcleos de calor atrapan los contaminantes atmosféricos. La neblina y niebla son más frecuentes. La precipitación es entre el 5% y el 10% mayor en las ciudades, las tormentas de agua y granizo mucho más frecuentes, y las nevadas menos comunes (Niemczynowics, J.M., 1991).

Muchos de los efectos de las áreas urbanas sobre el medio ambiente no son necesariamente lineales. Las áreas urbanas de mayor extensión no siempre crean más problemas ambientales; a veces son las áreas urbanas pequeñas las que pueden causar mayores problemas. Mucho de lo que

determina la magnitud del impacto ambiental es la conducta de la población urbana, su perfil de consumo y forma de vida, y no tan sólo su tamaño.

Problemas en la política ambiental urbana

Comenzando con la década de 1950, muchas ciudades en los países desarrollados han hecho frente a sus dificultades ambientales.

Mucha de la investigación que hay que hacer sobre el impacto ambiental de las áreas urbanas todavía no se ha realizado por falta de datos y financiamiento. La mayor parte de la información que existe es a nivel nacional, pero la investigación nacional es demasiado poco detallada para mejorar las condiciones ambientales de las áreas urbanas, por lo que hay que hacer investigación y obtener datos a nivel local que proporcionen a los gobiernos locales la información que necesitan para tomar decisiones. Ciertamente los miembros de la próxima generación, que en su mayoría vivirán en áreas urbanas, nos juzgarán basándose en si estamos haciendo las preguntas acertadas para proteger su ecología urbana. También van a querer saber si financiamos la investigación apropiada para abordar esas cuestiones, y si utilizamos los resultados de la investigación de manera sabia.

Análisis de calidad del escurrimiento pluvial urbano

Cuando se planifica un programa de manejo del escurrimiento pluvial hay una fuerte tendencia a considerar solamente la cantidad del escurrimiento y sus efectos tales como la inundación e ignorar los impactos por la calidad. Los efectos a largo plazo del escurrimiento contaminado pueden ser significativos y en algunos casos el aspecto más crítico.

El escurrimiento por precipitación urbana puede transportar varios contaminantes indeseables, algunos de los cuales bajarán el balance de oxígeno de los cauces o masas de aguas alcanzadas, algunos también acumularán y ejercerán efectos tóxicos en plantas acuáticas y animales, y otros de los cuales pueden estimular el crecimiento de microorganismos y plantas tales como algas y raíces acuáticas.

Estos componentes indeseables están compuestos de materia orgánica e inorgánica y además de material soluble e insoluble.

Los contaminantes y sus concentraciones son función de:

- grado de urbanización,
- tipo de uso del suelo,
- densidad del tráfico automotor,
- población animal y
- grado de contaminación atmosférica inmediatamente antes de la lluvia.

Según algunas mediciones en USA todos los usos de suelo en forma combinada producen después de 12 días sin lluvia 284 kg/km de cordón.

Se estima que la contaminación media por hectárea impermeabilizada y año equivale aproximadamente a:

- 15 hab.suplementarios/ha en sistemas separados (drenaje pluvial-cloaca),
- 25 hab.suplementarios/ha en sistemas combinados

Las características del escurrimiento en autopistas han sido el objetivo de varios estudios. El escurrimiento pluvial de las autopistas y de las superficies impermeables en las áreas altamente urbanizadas se ha evidenciado como contenedor de niveles significativos de contaminantes como la basura callejera, animales, deposición atmosférica y afluencias del escurrimiento de calles. Entre los contaminantes encontrados en el escurrimiento de las autopistas hay partículas, cromo, cobre, cadmio, níquel, nitrógeno, fósforo, cinc, manganeso, hidrocarburos de petróleo, y caucho.

Para el caso del escurrimiento generado en autopistas en la Tabla 1 se indican distintos tipos de contaminantes y su fuente de generación (Chen, C. W., 1975).

Tabla 1. Contaminantes y Fuentes en el Escurrimiento de Autopistas.

| Contaminante | Fuente |
|-----------------------|---|
| Partículas | Pavimento, vehículos, deposición atmosférica, actividades de mantenimiento |
| Nitrógeno, Fósforo | deposición atmosférica y aplicación de fertilizantes |
| Plomo | Naftas con plomo desde los escapes y neumáticos |
| Cinc | Neumáticos, aceites y grasa |
| Hierro | Estructuras de acero de las autopistas tales como puentes y guardarailes y partes móviles de los motores. |
| Cobre | Partes móviles de los motores, recubrimiento de frenos, fungicidas e insecticidas |
| Cadmium | Neumáticos y aplicación de insecticidas |
| Cromo | Partes móviles de los motores, recubrimiento de frenos |
| Níquel | Gasoil y nafta, aceite lubricante, recubrimiento de frenos, y pavimento asfáltico |
| Manganeso | Partes móviles de los motores |
| Petróleo | Derrames, fluidos anticongelantes e hidráulicos y superficie asfáltica |

Varios factores afectan las cargas constitutivas globales en el escurrimiento proveniente de las calles. Este escurrimiento se influencia fuertemente por las emisiones y pérdidas de fluidos del tráfico vehicular.

Otros estudios han encontrado que son significativas las concentraciones de algunos de los metales y nutrientes puestas en correlación con los sólidos suspendidos totales (SST). Estos resultados sugieren que controlando los SST se pueden reducir otros contaminantes con los mismos tamaños de partícula.

Los datos de contaminación del escurrimiento son altamente variables y dificultosos de generalizar. A causa de la naturaleza altamente variable y del tiempo de los eventos de lluvia, los datos obtenidos del monitoreo de tales eventos son también altamente variables. Además, los datos obtenidos en una región geográfica no son igualmente aplicables a otra región y los datos obtenidos en un sitio un año pueden no ser representativos de lo que es obtenido en el mismo sitio el próximo año. De todas maneras es necesario que la carga contaminante esperada sea estimada en alguna forma razonable, ya que el impacto de la calidad de agua potencial de tal contaminación, debe ser tenida en cuenta en planificaciones y manejo del escurrimiento.

Cualquier método usado debe tomar en cuenta la variabilidad o naturaleza estocástica de los eventos meteorológicos que producen el escurrimiento y los cambios estacionales y de largo tiempo, los cuales afectan la cantidad de contaminantes resultantes de una cantidad dada de lluvia.

Para cualquier gran área es mejor obtener datos de cargas reales de contaminación de pequeñas áreas con un único uso de tierra, determinado bajo varias condiciones estacionales o de

precipitación, y luego usar tales datos en conjunto con los provenientes de la literatura a otras áreas de similar uso de tierra, ya sea en el presente o en el futuro.

La Tabla 2 da el promedio de Km. de cordón por ha según el uso del suelo.

Tabla 2

| Uso del Suelo | Km de cordón/ha |
|----------------------|------------------------|
| Residencial | 0,17 a 0,50 |
| Comercial | 0,23 a 0,32 |
| Industrial | 0,099 a 0,17 |
| Parque | 0,17 |
| Espacio abierto | 0,059 a 0,063 |
| Edificios Públicos | 0,12 |

En base a una detallada recopilación de bibliografía internacional (James, W. et al., 2001; Jiménez Gallardo, B.R., 1999; Montt, J.P., 2000) sobre el tema se ha podido resumir la información en la Tabla 3.

Por otra parte también se realizó una revisión bibliográfica sobre reglamentaciones de calidad admisible del agua ya sea en cuerpos receptores como para riego. Las dos principales fuentes de información fueron las provenientes de Chile (Dirección General de Aguas) y del Departamento General de Irrigación de Mendoza.

Tabla 3. Valores mínimos, máximos y medios de contaminantes en función del uso del suelo

| Contaminante | Concentración | | USO DEL SUELO | | | | | | Dato base promedio | Valor recomendado promedio | |
|---------------------------|---------------|------------------|----------------------------|----------|---------------|-------------|-----------|---------|--------------------|----------------------------|--------|
| | | | Zona alta densidad tráfico | Vivienda | Departamentos | Residencial | Comercial | Parques | | | Global |
| Residuos | Máximo | kg/km cordón/día | | 268 | 217 | | 103 | | | | |
| | Mínimo | | | 1 | 2 | | 1 | | | | |
| | Medio | | | 17 | 32 | 19 | 25.5 | 23 | | | |
| Plomo | Máximo | mg/L (*) | | | | | | | 0.565 | | |
| | | mg/Kg (**) | | 5700 | 3700 | 400 | 7600 | 37 | | | |
| | Mínimo | mg/L | | | | | | | 0.059 | | |
| | | mg/Kg | | 220 | 470 | 20 | 0 | 6.7 | | | |
| | Medio | mg/L | | 0.010 | 0.005 | 0.424 | 0.118 | 0.066 | 0.160 | 0.201 | 0.116 |
| | | mg/Kg | | 1570 | 1980 | 114 | 2330 | 512.85 | | | |
| Cobre | Máximo | mg/L | | | | | | | | | |
| | | mg/Kg | | 150 | 170 | | 810 | | 1.537 | | |
| | Mínimo | mg/L | | | | | | | 0.039 | | |
| | | mg/Kg | | 33 | 34 | | 25 | | | | |
| | Medio | mg/L | | 0.015 | 0.012 | 0.039 | 0.039 | 0.018 | 0.081 | 0.047 | 0.028 |
| | | mg/Kg | | 91 | 73 | | 95 | 46 | | | |
| Zinc | Máximo | mg/L | | | | | | | | | |
| | | mg/Kg | | 810 | 490 | 170 | 3040 | 90 | | | |
| | Mínimo | mg/L | | | | | | | | | |
| | | mg/Kg | | 110 | 210 | 30 | 90 | 14 | | | |
| | Medio | mg/L | | 0.080 | 0.135 | 0.239 | 0.273 | 0.172 | 1.417 | 0.374 | 0.154 |
| | | mg/Kg | | 310 | 280 | 96 | 690 | 152.11 | | | |
| Cromo | Máximo | mg/L | | | | | | | 0.078 | | |
| | | mg/Kg | | 325 | 325 | | 430 | | | | |
| | Mínimo | mg/L | | | | | | | 0.009 | | |
| | | mg/Kg | | 111 | 75 | | 10 | | | | |
| | Medio | mg/L | | | | 0.030 | | 0.005 | 0.031 | | 0.800 |
| | | mg/Kg | | 200 | 180 | | 140 | 92 | | | |
| Nitrito | Máximo | mg/L | | | | | | | | | |
| | Mínimo | mg/L | | | | | | | | | |
| | Medio | mg/L | | 0.090 | 0.080 | 0.020 | 0.140 | 0.026 | | | |
| | | mg/Kg | | | | | | 7.670 | | | |
| Nitrate | Máximo | mg/L | | | | | | | | | |
| | | mg/Kg | | | | | 35 | | | | |
| | Mínimo | mg/L | | | | | | | | | |
| | | mg/Kg | | | | | 10 | | | | |
| | Medio | mg/L | | 1.040 | 1.730 | 0.750 | 0.580 | 1.155 | 3.550 | | |
| | | mg/Kg | | | | | 24 | 12.270 | | | |
| Sólidos Disueltos Totales | Máximo | | | | | | | | 788 | | |
| | Mínimo | mg/L | | | | | | | 8 | | |
| | Medio | | | | 575 | | 650 | 195.500 | | | |
| Magnesio | Máximo | | | | | 0.1 | | | | | |
| | Mínimo | mg/Kg | | | | 0 | | | | | |
| | Medio | | | | | 0.02 | | | | | |
| Hidrocarburos | Máximo | | 6.6 | | | | | | | | |
| | Mínimo | mg/L | 0.7 | | | | | | | | |
| | Medio | | | 1.4 | < 0.02 | < 1 | | | | | |

Referencias: $\text{mg/L}^{(*)}$: Fracción de contaminante presente en el agua de escorrentía
 $\text{mg/Kg}^{(**)}$: Fracción de contaminante con respecto a la acumulación de polvo y suciedad

ESTUDIO EN UN ÁREA URBANA DEL GRAN MENDOZA

El escurrimiento pluvial generado en el área urbana del Gran Mendoza, finalmente, es recibido por el canal Cacique Guaymallén, que es uno de los canales matrices de riego del área Norte de Mendoza, y con los caudales vertidos también va la contaminación que el escurrimiento se ha encargado de arrastrar en su trayecto, llevando así los contaminantes a los cauces de riego que sirven a la producción agrícola, es decir que el canal Cacique Guaymallén tiene ambas características: es cuerpo receptor de los escurrimientos pluviales y es conductor de aguas para riego.

El objetivo del estudio fue modelar matemáticamente el escurrimiento pluvial urbano en cantidad y calidad en un sector de la ciudad de Mendoza (Figura 1) y poder cuantificar su incidencia en el agua para riego.

El área urbana del Gran Mendoza seleccionada es la limitada al Norte por las calles A. Villanueva, Colón y V. Zapata; al Este por el canal Cacique Guaymallén; al Sur por el zanjón Frías; al Este canal Jarillal sobre calle Boulogne Sur Mer.

Lamentablemente no se ha podido seleccionar como área una cuenca hidrológica, entendiéndose como tal aquella área cuyos límites se constituyen en divisorias de agua y existe un único exutorio, lo cual es muy difícil de que se produzca en un área urbana, ya que si bien para pequeños escurrimientos pueden funcionar como cuencas, cuando se producen eventos hidrológicos de cierta magnitud la escorrentía es trasvasada a través de las calles y desagües pluviales hacia otras áreas. El área mencionada fue seleccionada por las siguientes razones:

- La existencia de una interesante variedad de usos del suelo: residencial con casas y con departamentos, comercial y parque.
- Cercanía del INA-CRA para poder realizar las mediciones (el edificio del INA-Mendoza se encuentra dentro de los límites mencionados)
- Existencia de una estación de medición de lluvia dentro del área
- El exutorio (punto más bajo del área) está en la margen del canal Cacique Guaymallén

En la Tabla 4 se detallan las características físicas de las 9 subcuencas en que se dividió el área de estudio como se puede visualizar en la Figura 2. En la Tabla 5 se pueden visualizar las proporciones de usos del suelo en cada subcuenca.

Tabla 4. Características físicas de las subcuencas

| Subcuenca Nº | Conducto | Ancho (m) | Área (ha) | Impermeab. (%) | Pendiente (m/m) |
|--------------|----------|---------------|--------------|----------------|-----------------|
| 301 | 101 | 873.1 | 31.4 | 85.15 | 0.0210 |
| 302 | 102 | 789.3 | 30.1 | 84.73 | 0.0173 |
| 303 | 103 | 726.7 | 25.7 | 84.25 | 0.0168 |
| 304 | 105 | 259.3 | 15.1 | 72.98 | 0.0190 |
| 305 | 106 | 219.6 | 5.9 | 71.61 | 0.0185 |
| 306 | 104 | 346.9 | 27.8 | 63.35 | 0.0191 |
| 307 | 107 | 496.3 | 12.6 | 78.36 | 0.0169 |
| 308 | 108 | 478.5 | 10.4 | 78.26 | 0.0140 |
| 309 | 9 | 449.6 | 17.0 | 78.92 | 0.0102 |
| | | Total= | 176.0 | | |

| | |
|----------------------------|--------|
| Nº de subcuencas | 9 |
| Área tributaria total (ha) | 176.00 |
| Área impermeable (ha) | 138.18 |
| Impermeabilidad (%) | 78.51 |
| Longitud de cunetas (km) | 52.00 |

Tabla 5. Usos del suelo

| Subcuenca | Usos del suelo | | | |
|-----------|----------------|--------|--------|--------|
| | casas | deptos | comerc | parque |
| 301 | 0.9 | 0.1 | 0.0 | 0.0 |
| 302 | 0.8 | 0.1 | 0.1 | 0.0 |
| 303 | 0.7 | 0.1 | 0.2 | 0.0 |
| 304 | 0.3 | 0.5 | 0.2 | 0.0 |
| 305 | 0.3 | 0.5 | 0.2 | 0.0 |
| 306 | 0.0 | 0.3 | 0.0 | 0.7 |
| 307 | 0.1 | 0.6 | 0.3 | 0.0 |
| 308 | 0.1 | 0.5 | 0.4 | 0.0 |
| 309 | 0.3 | 0.1 | 0.6 | 0.0 |

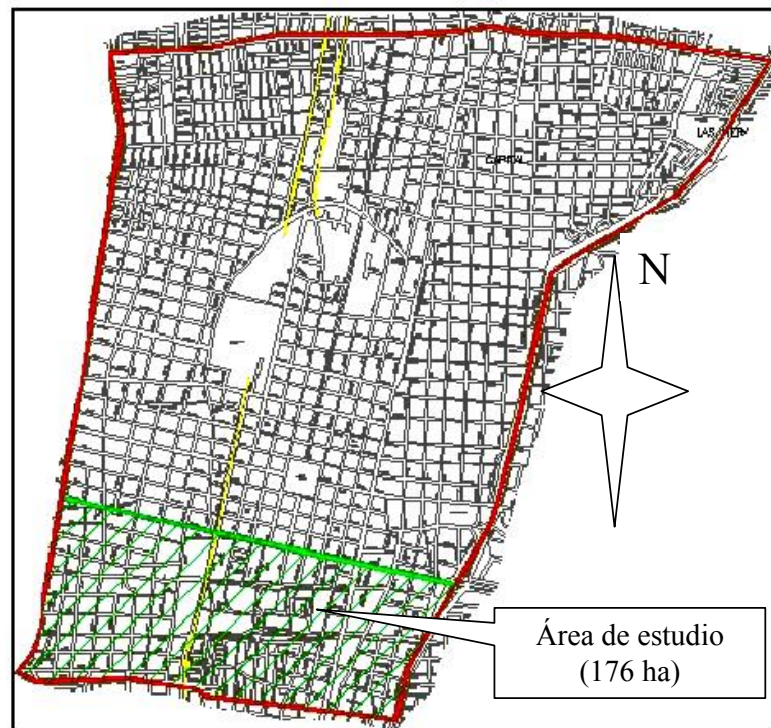
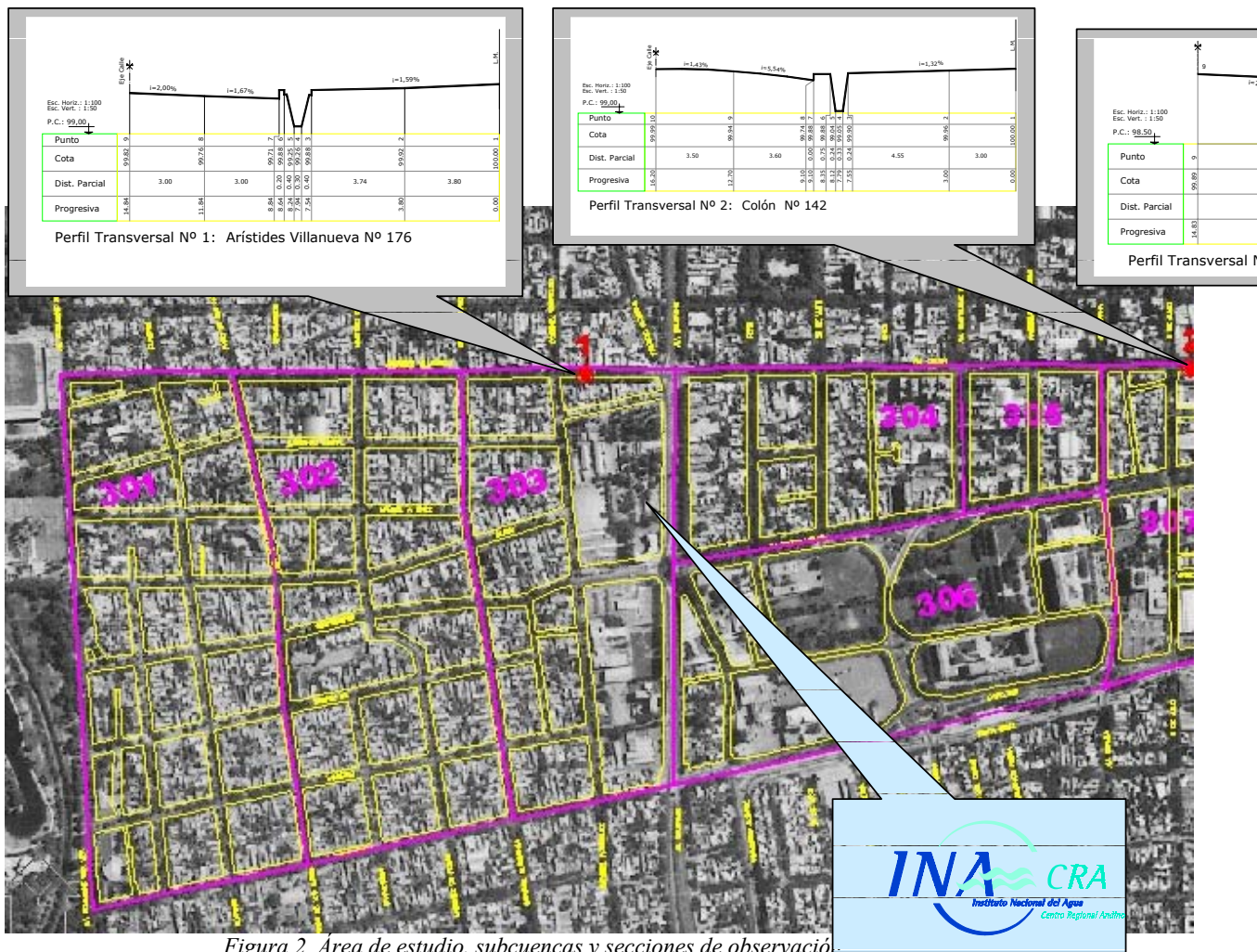


Figura 1. Planimetría de la ciudad de Mendoza

Modelación

Frecuentemente, una de las principales razones para considerar la modelación puede ser la necesidad de controlar la calidad del agua. Algunos problemas prácticos referidos a la calidad del agua pueden ser resueltos por modelación del flujo solamente.

Por ejemplo, un problema de rebalse en un sistema combinado de alcantarillado puede ser eliminado reduciendo la frecuencia y magnitud del embalse, sin prestar atención a la modelación de la calidad del rebalse. Otro aspecto es que la modelación de la calidad del escurrimiento superficial no está tan avanzado como la modelación hidrológica e hidráulica, ya que los principios básicos de hidrología e hidráulica son bien conocidos pero los principios de calidad del agua son solo parcialmente conocidos.



k= coeficiente empírico que varía entre 1 y 6 (SWMM usa k=4,6)
R= tasa de escurrimiento

Se asumen varias condiciones:

- la cantidad de contaminantes que pueden removerse durante un evento de lluvia es dependiente de la duración de la lluvia y de la cantidad inicial disponible para su remociónningún contaminante decae debido a los cambios químicos o la degradación biológica durante el proceso de escurrimientolas cantidades de contaminantes que percolan en el suelo no son significativas
- en tormentas de baja intensidad la mayoría de la masa de sólidos en una cuenca urbana no puede transportarse por la insuficiente energía en el escurrimiento

Entre una gran cantidad de modelos se pueden citar: STORM (HEC), HSPF (U.S. EPA), SWMM (U.S. EPA), RUNQUAL (Detroit), MITCAT (MIT), HVM-QQS (Alemania), etc.

Modelo PCSWMM

El modelo SWMM (Storm Water Management Model) de la Agencia de Protección Ambiental de EEUU (U.S. E.P.A.) es un modelo computacional del tipo determinístico que sirve para analizar problemas de cantidad y calidad asociados al escurrimiento pluvial urbano.

Se pueden modelar eventos, tanto continuos como aislados, en cuencas que poseen sistemas de drenaje pluvial único o combinado con cloacas, para predecir escurrimientos, alturas de agua y concentración de contaminantes.

Se pueden simular eventos de lluvia, nieve, flujo superficial y subsuperficial, tránsito en la red de drenaje, almacenamiento y tratamiento del escurrimiento. SWMM puede utilizarse para planificación o diseño (Computational Hydraulics International, 2003).

RUNOFF: simula el escurrimiento pluvial a partir de la información de lluvia y de los datos físicos de la cuenca utilizando el algoritmo de un embalse semi-lineal (Figura 3) y ecuaciones de infiltración como Horton o Green-Ampt

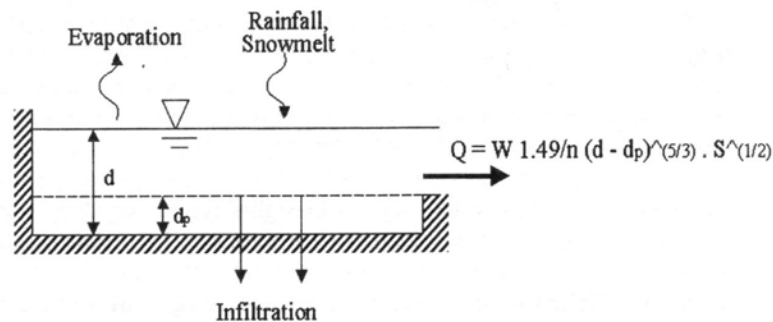


Figura 3. Esquema de simulación del escurrimiento pluvial utilizado por SWMM

TRANSPORT: simula el tránsito de flujo y de contaminantes por medio de la onda cinemática

EXTRAN: simula el tránsito de flujo en la red de drenaje por medio de las ecuaciones completas de Saint-Venant

RECEIVE: analiza el flujo que eroga la cuenca y se deposita en el cuerpo de agua receptor

En este estudio se ha utilizado la versión PCSWMM2003 de Computational Hydraulics Int. (CHI) de Canadá, la cual está desarrollada a través de la programación por objetos, generando un manejo “amigable” para la introducción de datos de entrada. También PCSWMM permite introducir los datos físicos de la cuenca y de la red de drenaje a través de una interfase con Sistema de Información Geográfica (GIS).

Con respecto a la simulación de la calidad del escurrimiento pluvial, en este estudio se ha utilizado la opción de que los contaminantes se expresan como una proporción en peso de los residuos y suciedad que existe en la calle antes del comienzo de la precipitación.

Medición de contaminantes

El desarrollo de herramientas de análisis del escurrimiento urbano ha ido detrás de la base de mediciones de campo que soportan su validez. De todos modos siempre hay necesidad de más observaciones de campo de cuencas representativas y experimentales para mejorar la credibilidad de las herramientas de análisis utilizadas en planificación, diseño y operación. Uno de los objetivos de la medición de calidad del escurrimiento es la identificación de la contribución de distintos usos del suelo a la descarga contaminante total para así optimizar el desarrollo urbano y establecer algunas regulaciones específicas (Biesecker, J. L. et al, 1976).

A causa de que la ocurrencia de escurrimiento por lluvia en sistemas urbanos es un proceso aleatorio, la adquisición de datos de contaminantes requiere un programa de muestreo más sofisticado que el que puede ser utilizado en evaluación de calidad de agua ambiente.

Cuando los eventos de lluvia ocurren, especialmente en pequeñas cuencas urbanas con cortos tiempos de concentración, la carga pico de contaminantes puede tomar lugar antes que el personal sea capaz de ocupar lugares y comenzar el muestreo manual.

Por esta razón puede ser deseable diseñar un programa de adquisición de datos para incorporar el uso de aforadores y equipos de muestreo automáticos.

El muestro automático, que es altamente eficiente, requiere una fuerte inversión inicial y necesita de un mantenimiento con personal entrenado.

Si se usan métodos de muestreo manual, su gran simplicidad y flexibilidad son balanceados por fallas para obtener datos cuando ocurre la lluvia, sin predicción a priori. En cualquier caso se debe asegurar que los métodos empleados representen adecuadamente la cantidad y la calidad del caudal de escurrimiento (Geiger, W.J. et al., 1987)

El muestro manual evita gasto de capital inicial, necesita gran cantidad de mano de obra, tiene dificultades en la simultaneidad de varias mediciones, necesita personal entrenado y requiere una buena preparación logística.

Equipamiento y metodología utilizada

En este estudio se utilizó la técnica de muestro manual, para ello se dispuso del equipamiento detallado en la Figura 4 que consiste de velocímetro digital, recipientes para el agua de muestra, termómetro digital y heladeras para mantener los frascos de muestras en temperatura adecuada.



Figura 4. Equipamiento utilizado para realizar mediciones y tomas de muestras

Estos elementos se disponían listos para salir prestamente en el vehículo utilitario equipado con ellos, cuando se producía el evento precipitación-escurrimiento. El personal interviniente en las mediciones se organizó en comisiones de tres personas que hacían guardias semanales pasivas que se transformaban en activas a partir del momento en que, ante la consulta pertinente, el Servicio Meteorológico Nacional daba pronóstico de tormentas convectivas.

Las mediciones se realizaron en puntos de medición previamente seleccionados. Tal selección se realizó en base a los siguientes criterios:

- Representatividad de un grupo de cuencas con preponderancia de determinados usos del suelo
- Posibilidad física de poder introducir el velocímetro para medir el flujo en acequia
- Posibilidad de poder acceder con facilidad y rápidamente

Se realizaron campañas de medición en los eventos del 10/03/03, 12/01/04 y 22/01/04. En la Tabla 7 figuran los valores observados de caudales y los resultados de los análisis químicos de las muestras extraídas. Los análisis químicos se realizaron en los siguientes laboratorios:

- Evento del 10/03/03 en la Univ. Nac. de San Luis
- Eventos del 12/01/04 y 22/01/04 en el INA-CRAS salvo las determinaciones de hidrocarburos que se realizaron en la Univ. Nac. de Cuyo-Fac. de Ingeniería

CALIBRACIONES Y VALIDACIONES

Análisis de la simulación de la cantidad de escurrimiento

Los datos de entrada al modelo para la simulación de la cantidad de escurrimiento son los que figuran en la Tabla 6. Como se puede apreciar en el caso de los parámetros físicos, éstos no dan margen para que sean sensibles a una calibración si se tiene un adecuado material cartográfico como en este estudio, lo que no ocurre con los parámetros hidrológicos (rugosidad, almacenamiento en depresiones y parámetros de la ecuación de infiltración de Horton).

Tabla 6. Datos de entrada al modelo

| |
|-------------------------|
| Parámetros hidrológicos |
|-------------------------|

| Parámetros físicos | | | | | | Rugosidad | | Almacenamiento en Depresiones (mm) | | Infiltración | | |
|--------------------|----------|-----------|-----------|----------------|-----------------|------------------|----------------|------------------------------------|----------------|----------------------|-----------------------|------------------------|
| Subcuenca N° | Conducto | Ancho (m) | Área (ha) | Impermeab. (%) | Pendiente (m/m) | Impermeab. (WW5) | Permeab. (WW6) | Impermeab. (WW7) | Permeab. (WW8) | Máxima (mm/hr) (WW9) | Mínima (mm/hr) (WW10) | Decaim. (1/seg) (WW11) |
| 301 | 101 | 873.1 | 31.4 | 85.15 | 0.0210 | 0.025 | 0.250 | 5 | 10 | 75 | 12 | 0.002 |
| 302 | 102 | 789.3 | 30.1 | 84.73 | 0.0173 | 0.025 | 0.250 | 5 | 10 | 75 | 12 | 0.002 |
| 303 | 103 | 726.7 | 25.7 | 84.25 | 0.0168 | 0.025 | 0.250 | 5 | 10 | 75 | 12 | 0.002 |
| 304 | 105 | 259.3 | 15.1 | 72.98 | 0.0190 | 0.025 | 0.250 | 5 | 10 | 75 | 12 | 0.002 |
| 305 | 106 | 219.6 | 5.9 | 71.61 | 0.0185 | 0.025 | 0.250 | 5 | 10 | 75 | 12 | 0.002 |
| 306 | 104 | 346.9 | 27.8 | 63.35 | 0.0191 | 0.025 | 0.250 | 5 | 10 | 75 | 12 | 0.002 |
| 307 | 107 | 496.3 | 12.6 | 78.36 | 0.0169 | 0.025 | 0.250 | 5 | 10 | 75 | 12 | 0.002 |
| 308 | 108 | 478.5 | 10.4 | 78.26 | 0.0140 | 0.025 | 0.250 | 5 | 10 | 75 | 12 | 0.002 |
| 309 | 9 | 449.6 | 17.0 | 78.92 | 0.0102 | 0.025 | 0.250 | 5 | 10 | 75 | 12 | 0.002 |
| | | | Total= | 176.0 | | | | | | | | |

Tabla 7. Valores observados en los eventos

| LABORATORIO | Univ. Nac. San Luis | | INA-CRAS | | | | | | | | | |
|---|---------------------|--------|--------------|--------------|--------------|--------------|--------------|--------------|--------------|--------------|--------------|--------|
| | 10/03/2003 | | 12/01/2004 | | | | 22/01/2004 | | | | | |
| Precip total media mm | 7.0 | | 6.5 | | | | 4.8 | | | | | |
| Sección de observación | 3 Ac | 3 C | 1 Ac | 1 C | 2 Ac | 3 Ac | 3 C | 1 Ac | 1 C | 2 Ac | 3 Ac | |
| Hr Observación | 22:45 | | 18:55 | | 19:50 | | 19:20 | | 20:40 | | | |
| Caudales m3/s | 0.565 | | 0.142 | | 0.074 | | 0.1396 | | 0.2125 | | 0.1098 | 0.1571 |
| Fecha Análisis | | | 09/02/2004 | 09/02/2004 | 09/02/2004 | 09/02/2004 | 09/02/2004 | 09/02/2004 | 09/02/2004 | 09/02/2004 | 09/02/2004 | |
| Temperatura °C | | | 24.8 | nd | 27.6 | 26.4 | 27.7 | 23.8 | 25 | 23.7 | 23.8 | |
| Cond.Eléc. µS/cm a 25°C | 332 | 333 | 734 | 2030 | 538 | 655 | 753 | 319 | 307 | 382 | 474 | |
| pH (unid. de pH) | 6.98 | 6.74 | 6.3 | 7.5 | 5.7 | 6.2 | 7.9 | 6.6 | 6 | 6.6 | 6.7 | |
| Alcalin. Total mg/l CaCO3 | | | 82 | 226 | 111 | 206 | 230 | 98 | 98 | 113 | 118 | |
| Arsénico mg/l | <0.001 | <0.001 | 0.006 | 0.006 | 0.004 | 0.005 | 0.003 | <0.003 | <0.003 | 0.003 | 0.003 | |
| Bario mg/l | | | 0.244 | 0.412 | No detectado | No detectado | 0.556 | 0.3 | 0.093 | 0.372 | 0.158 | |
| Bicarbonato mg/l | | | 100 | 276 | 136 | 251 | 280 | 120 | 119 | 138 | 144 | |
| Boro mg/l | | | 0.16 | 0.84 | 0.18 | 0.19 | 0.25 | 0 | 0.09 | 0.06 | 0.03 | |
| Calcio mg/l | | | 92 | 287 | 52 | 94 | 95 | 42 | 40 | 46 | 61 | |
| Carb. Sodio Res. (CSR) | | | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | |
| Cinc mg/l | 0.571 | 0.63 | 1.89 | 0.628 | 0.41 | 0.313 | 0.516 | 0.118 | 0.145 | 0.176 | 0.156 | |
| Clas. Aniónica (> 20% me) | | | Sulfatada | Sulfatada | Bicarb. | Bicarb. | Bicarb. | Bicarb. | Bicarb. | Bicarb. | Bicarb. | |
| Clas. Catiónica (>20 % me) | | | Cálcica | Cálcica | Cálcica | Cálcica | Cálcica | Cálcica | Cálcica | Cálcica | Cálcica | |
| Cloruro mg/l | | | 59 | 252 | 39 | 35 | 61 | 18 | 22 | 26 | 22 | |
| Cobre mg/l | 0.068 | 0.048 | No detectado | < 0.06 | No detectado | No detectado | No detectado | < 0.06 | 0.073 | 0.064 | < 0.06 | |
| Cromo mg/l | 0.034 | 0.027 | 0.059 | 0.063 | No detectado | < 0.005 | No detectado | 0.091 | 0.075 | 0.082 | 0.079 | |
| Dureza Total mg/l CaCO3 | | | 268 | 876 | 151 | 260 | 271 | 118 | 121 | 137 | 180 | |
| Dza. no carb. mg/l CaCO3 | | | 186 | 650 | 49 | 54 | 41 | 20 | 24 | 24 | 63 | |
| Fluoruro mg/l | | | 0.4 | 0.3 | 0.3 | 0.3 | 0.4 | 0.2 | 0.2 | 0.2 | 0.3 | |
| Hidrocarb.Paráf.Tot. mg/l (UNCuyo-Fac.Ing.) | | | < 0.05 | 6.70 | 1.00 | 4.70 | 1.30 | <0.05 | 1.20 | 1.10 | 1.00 | |
| Magnesio mg/l | | | 9.3 | 39 | 5.2 | 6.3 | 7.9 | 3.5 | 5.2 | 5.5 | 6.7 | |
| Nitrato mg/l | 210 | | 8.4 | 28 | 19 | 13 | 16 | 5.8 | 11 | 16 | 9.3 | |
| Nitrito mg/l | 0.02 | | | | | | | | | | | |
| Plomo mg/l | 0.02 | 0.045 | 0.015 | 0.021 | 0.025 | 0.053 | 0.05 | 0.02 | <0.002 | 0.029 | < .002 | |
| Potasio mg/l | | | 9.1 | 87 | 31 | 25 | 33 | 11 | 19 | 16 | 17 | |
| Rel. Ads. Sodio (RAS) | | | 1.17 | 1.36 | 0.92 | 0.68 | 1.16 | 0.48 | 0.4 | 0.56 | 0.71 | |
| Silice mg/l | | | 2.6 | 13 | 2.6 | 6.3 | 8.7 | 3.7 | 4.6 | 3.6 | 3.9 | |
| Sodio mg/l | | | 44 | 93 | 26 | 25 | 44 | 12 | 10 | 15 | 22 | |
| Sól.Dis. Calc.mg/l | | | 482 | 1520 | 297 | 410 | 493 | 185 | 196 | 230 | 305 | |
| Sól. Susp. a 105°C mg/l | | | 256 | 1070 | 186 | 418 | 446 | 246 | 262 | | | |
| Sól. Tot. Dis. mg/l | 270 | 230 | | | | | | | | | | |
| Sól.Sedimentab. ml/hr | 5.5 | 5.2 | | | | | | | | | | |
| Sulfato mg/l | | | 205 | 577 | 52 | 94 | 95 | 42 | 40 | 33 | 91 | |
| Clasificación y aptitud para riego: | | | | | | | | | | | | |
| Por Cond. Eléctrica | | | C2-Buena | C3-Regular | C2-Buena | C2-Buena | C3-Regular | C2-Buena | C2-Buena | C2-Buena | C2-Buena | |
| Por RAS | | | S1-Excelente | S1-Excelente | S1-Excelente | S1-Excelente | S1-Excelente | S1-Excelente | S1-Excelente | S1-Excelente | S1-Excelente | |
| Por CSR | | | 1-Excelente | 1-Excelente | 1-Excelente | 1-Excelente | 1-Excelente | 1-Excelente | 1-Excelente | 1-Excelente | 1-Excelente | |
| Por B p/cultivos sensibles | | | 1-Excelente | 3-Regular | 1-Excelente | 1-Excelente | 1-Excelente | 1-Excelente | 1-Excelente | 1-Excelente | 1-Excelente | |
| Por B p/cultivos semitoler. | | | 1-Excelente | 2-Buena | 1-Excelente | 1-Excelente | 1-Excelente | 1-Excelente | 1-Excelente | 1-Excelente | 1-Excelente | |
| Por B p/cultivos tolerantes | | | 1-Excelente | 1-Excelente | 1-Excelente | 1-Excelente | 1-Excelente | 1-Excelente | 1-Excelente | 1-Excelente | 1-Excelente | |

donde: 1C= sección de observación 1 muestra de calzada
1Ac= sección de observación 1 muestra de acequia

Sin embargo, y como se puede apreciar en el gráfico de sensibilidad de parámetros generado por PCSWMM en la Figura 5, solamente son sensibles en los casos analizados, con respecto al caudal pico, el coeficiente de rugosidad (WW5) y el almacenamiento en depresiones (WW7) de la parte impermeable de la cuenca. Se puede interpretar del mencionado gráfico que una variación de -25% en el coeficiente de rugosidad (WW5), genera un aumento de 13,3 % en el caudal pico y una variación de -25% en el almacenamiento por depresiones (WW/) produce un aumento en el caudal pico de 45 %.

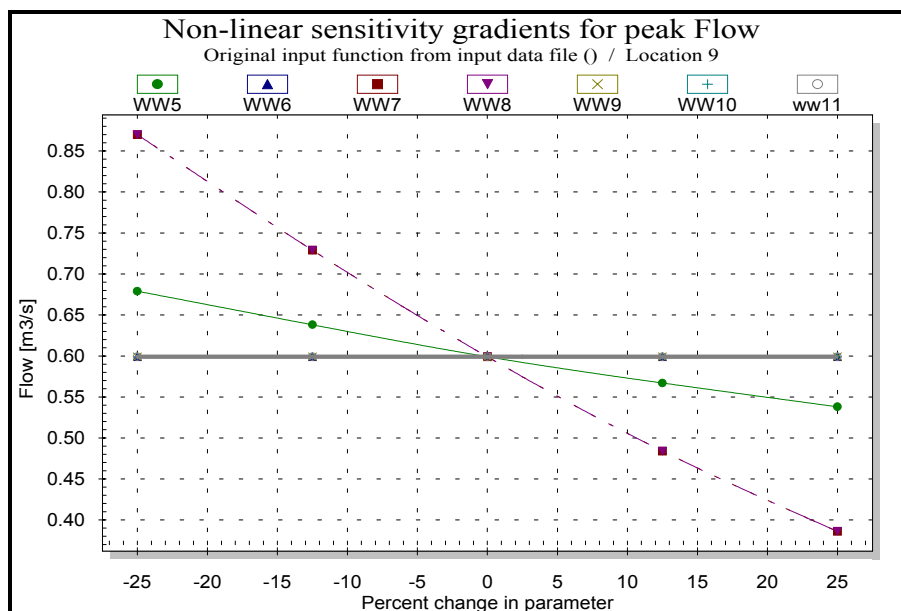


Figura 5. Gráfico de sensibilidad de parámetros generado por PCSWMM

A efectos de comparar resultados se realizó una corrida del modelo ARHYMO (Fornero, L. et al., 2002) con el evento del 22/01/04 (Figura 10). Los valores de los parámetros, tanto físicos como hidrológicos, de ARHYMO fueron iguales a los utilizados en PCSWMM.

Como se puede apreciar, salvo en la sección 2, no hay coincidencia entre los hidrogramas generados por ambos modelos. Seguramente tal diferencia se origina en los métodos de generación de hidrogramas y de tránsito de hidrogramas en conducciones:

| Operación hidrológica | Modelos | |
|---------------------------|-------------------|--|
| | PCSWMM | ARHYMO |
| Generación de hidrogramas | Embalse no-lineal | Hidrograma Unitario en base a la analogía de un embalse lineal |
| Tránsito de hidrogramas | Onda cinemática | Método hidrológico (Tiempo de Traslado Variable) |

Procedimiento de calibración para la simulación de contaminantes

La calibración se llevó a cabo con los datos observados del evento del 22/01/04 ya que fue el evento con el que se obtuvo mayor información de escurrimiento y de contaminantes. No se utilizó la totalidad de los contaminantes observados (25) sino solamente aquéllos que se repetían en cada evento y que, por la bibliografía consultada, tenían carácter relevante.

En base a las siguientes expresiones:

$$residuos = DD = DDFACT [kg / km / día] * t^{DDPOW} \leq DDLIM [kg / kmcordón]$$

$REMAIN = 1 - AVSWP(J) * REFF(K)$ que es la fracción de residuos remanente en superficie donde:

AVSWP(J)= fracción de cuenca que es realmente factible de limpiar

REFF (K)= eficiencia de limpieza

$PSHED_0 = QFACT(J, K)$ carga de contaminante inicial

$$[QFACT(J, K)] = \frac{mg}{g}$$

donde:

- J = uso del suelo
- K = contaminante
- mg = peso del contaminante
- g = gramos de residuos

QFACT es el factor que representa la proporción de contaminante en peso de los residuos y suciedad y que fue motivo de calibración en este estudio

$$PSHED_{t+\Delta t} = PSHED_t * e^{-RCOEFF \frac{r(t)^{WASHPO} + r(t+\Delta t)^{WASHPO}}{2} \Delta t}$$

donde:

- PSHED = carga de contaminante en el tiempo t
- RCOEFF = coeficiente variable entre 1 y 10 (motivo de calibración en este estudio)
- WASHPO = exponente que es <1 para contaminantes disueltos. En este estudio se consideró igual a 0.8 (James, W. et al., 2001).
- r(t) = precipitación efectiva en el tiempo t

y para poder calibrar los parámetros de PCSWMM vinculados a la simulación de contaminación se asumieron los siguientes valores de parámetros:

- **DDFACT** [Kg/km cordón/día]= se asumieron los valores que figuran en la Tabla 8 y que son lo que se indican en la Tabla 3 de Valores mínimos, máximos y medios de contaminantes en función del uso del suelo.
- **CLFREQ**= se asumió que las calles se limpian cada 2 días
- **AVSWP**= se consideró que en todos los casos de usos del suelo hay una accesibilidad de 95% para realizar la limpieza de las calles
- **DSLCL**= se ha considerado que cuando comienza el evento de lluvia han transcurrido 1,6 días desde que se produjo la última limpieza
- **REFF**= se ha considerado que hay un 70% de eficiencia en el trabajo de limpieza de las calles
- **DDPOW**= se ha considerado que hay una dependencia lineal (DDPOW=1) de la acumulación de residuos en el tiempo
- **WASHPO**= se ha considerado un valor de 0,8 (recomendado por la bibliografía) ya que los contaminantes analizados son del tipo disuelto y de esta manera la concentración disminuye con el incremento de caudal

Tabla 8. Parámetros de PCSWMM para la simulación de contaminación

| Tarjeta | LNAME | METHOD | JACGUT | DDLIM | DDPOW | DDFACT | CLFREQ | AVSWP | DSLCL |
|---------|---------------|---------------|--------------------------------|--------------|-------|------------------|------------------|-----------------------------|-------------------------------|
| | uso del suelo | Lineal-Potenc | Indica que se usa long. Cordón | kg/km cordón | | Kg/km cordón/día | interv. limpieza | accesibilidad para limpieza | días desde la última limpieza |
| J2 | 'casas' | 0 | 0 | 10000 | 1 | 17 | 2 | 0.95 | 1.6 |
| J2 | 'deptos' | 0 | 0 | 10000 | 1 | 32 | 2 | 0.95 | 1.6 |
| J2 | 'comerc' | 0 | 0 | 10000 | 1 | 25.5 | 2 | 0.95 | 1.6 |
| J2 | 'parque' | 0 | 0 | 10000 | 1 | 23 | 2 | 0.95 | 1.6 |

En consecuencia la calibración se centró en la variación de los parámetros RCOEF y QFACT(J,K), de manera tal que este último factor no tuviera un valor muy alejado de los estándares que figuran en la mencionada Tabla 3.

Los valores de RCOEFF fueron de 1 para el caso de Cromo y de 10 para el resto de los contaminantes considerados (la bibliografía recomienda un rango de 1 a 10).

Los valores de QFACT(J,K) fueron calibrados mediante un proceso lineal iterativo que tuvo en cuenta:

- los kg de residuos por día y por uso del suelo considerando los valores de DDFACT, los km de cordón y la proporción de diferentes usos del suelo en cada subcuenca
- el valor de QFACT anterior
- los valores observado y calculado de concentración del contaminante multiplicados por el valor del caudal pertinente [$\text{mg/l} \times \text{m}^3/\text{s}$] en cada una de las secciones de observación

El proceso iterativo se finaliza cuando la sumatoria del cuadrado de los errores para cada uso del suelo es igual a la inmediatamente anterior.

Es de aclarar que para ningún contaminante, salvo el cromo (Figura 5), se pudo lograr un conjunto de 4 valores (para cada uno de los usos del suelo) que produjera error cero (Figura 6).

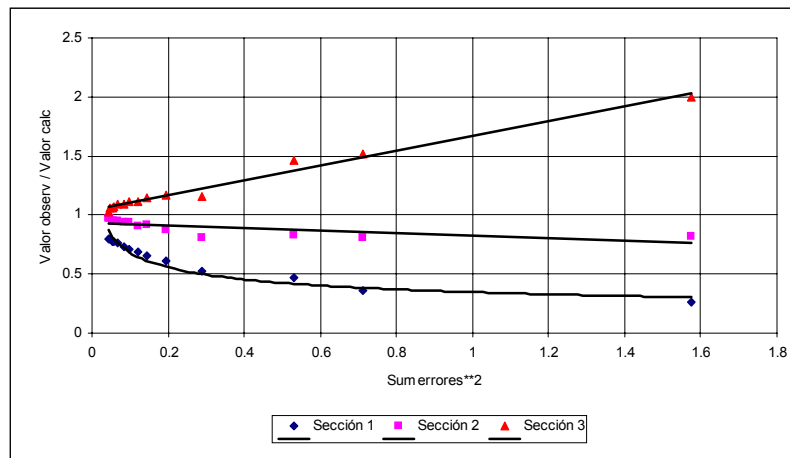


Figura 5. Calibración de QFACT para Cr

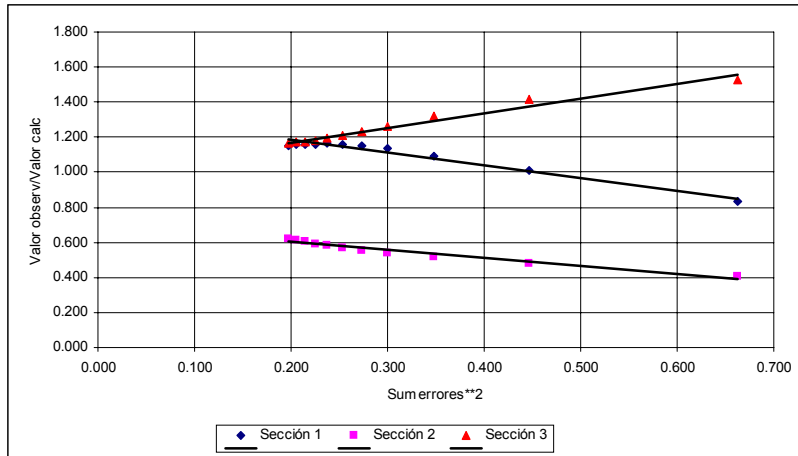


Figura 6. Calibración de QFACT para NO3 (gráficos similares para los otros contaminantes)

Los valores de QFACT (J,K) así obtenidos se reflejan en la Tabla 9 donde también se han detallado los valores de referencia (Tabla 3) que da la bibliografía. Como se puede apreciar los valores obtenidos por calibración distan mucho de los valores de referencia.

Tabla 9. Valores de QFACT (J,K)

| Uso del Suelo (J) | Valores de QFACT(J,K) [mg/g] | | | | | | | | | | | | | | | |
|-------------------|------------------------------|--------|---------|--------|---------|--------|----------|--------|---------|--------|---------|---------|---------|--------|---------|--------|
| | Contaminantes (K) | | | | | | | | | | | | | | | |
| | NO3 | | Cr | | Zn | | Cloruros | | Cu | | Mg | | HPT | | Ba | |
| | calibr. | refer. | calibr. | refer. | calibr. | refer. | calibr. | refer. | calibr. | refer. | calibr. | refer. | calibr. | refer. | calibr. | refer. |
| 'casas' | 1.086 | s/d | 0.002 | 0.200 | 0.015 | 0.310 | 2.504 | s/d | 0.008 | 0.091 | 0.488 | S/d | 0.071 | 0.001 | 0.025 | s/d |
| 'deptos' | 0.733 | s/d | 0.399 | 0.180 | 0.021 | 0.280 | 1.219 | s/d | 0.002 | 0.073 | 0.243 | S/d | 0.053 | 0.001 | 0.031 | s/d |
| 'comerc' | 5.349 | 0.024 | 2.623 | 0.140 | 0.082 | 0.690 | 12.136 | s/d | 0.031 | 0.095 | 3.731 | 2.0E-05 | 0.573 | s/d | 0.084 | s/d |
| 'parque' | 0.002 | s/d | 0.036 | 0.092 | 0.002 | 0.152 | 0.000 | s/d | 0.000 | 0.046 | 0.000 | S/d | 0.000 | s/d | 0.007 | s/d |

Resultados de la calibración en el evento del 22/01/04

En base a la información pluviométrica de la Red Hidrometeorológica Telemétrica que el INA-CRA posee en el piedemonte y área urbana del Gran Mendoza se trazaron isohietas cada 5 minutos a efectos de determinar las precipitaciones medias en cada una de las 9 subcuencas. Es de hacer notar que en la Figura 7 se puede apreciar la ubicación de la estación 2300 de la mencionada red dentro del área de estudio.

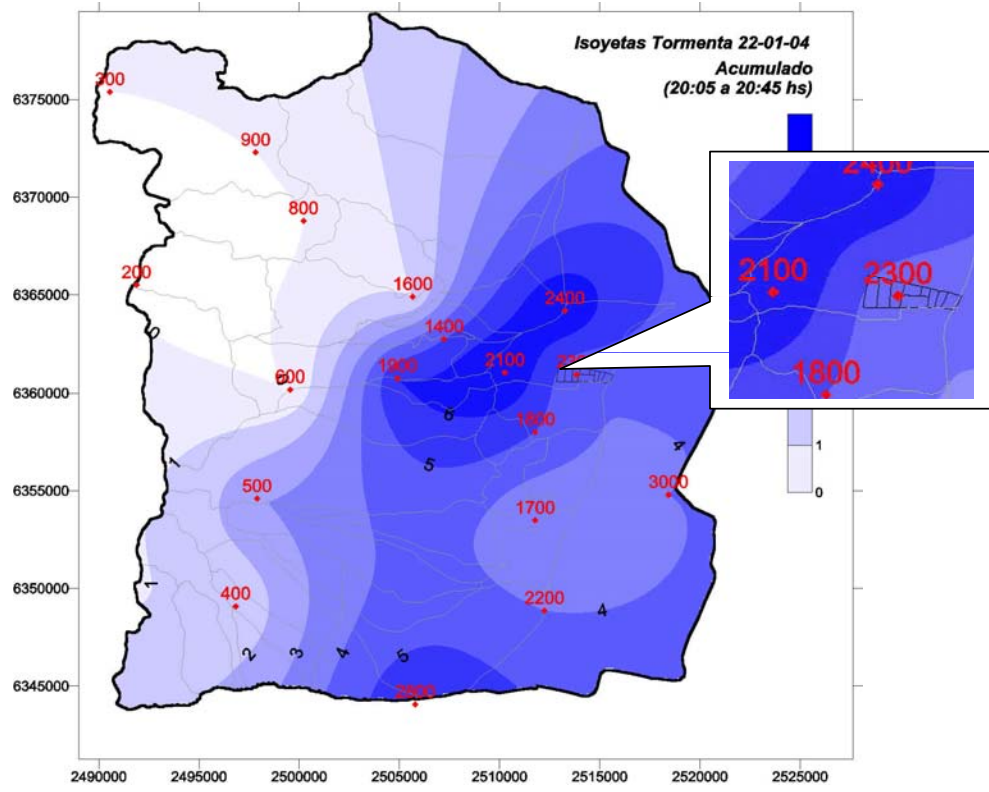


Figura 7. Isohietas totales del evento del 22/01/04

En la Figura 8 se pueden apreciar los hidrogramas generados por PCSWMM y ARHYMO para el evento del 22/01/04 en las diferentes secciones de observación y el valor de caudal observado

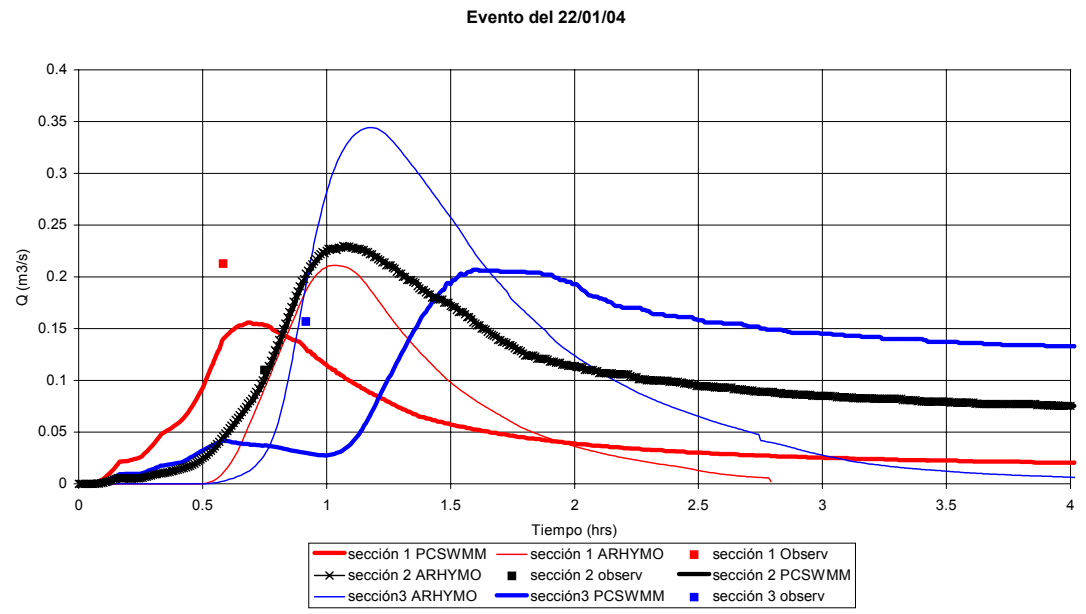


Figura 8. Hidrogramas en secciones 1, 2 y 3

En las figuras 9 y 10 se pueden apreciar algunos de los poluto gramas generados por PCSWMM para el evento del 22/01/04 en base a la calibración descrita y los valores de concentración observados en cada una de las tres secciones de observación.

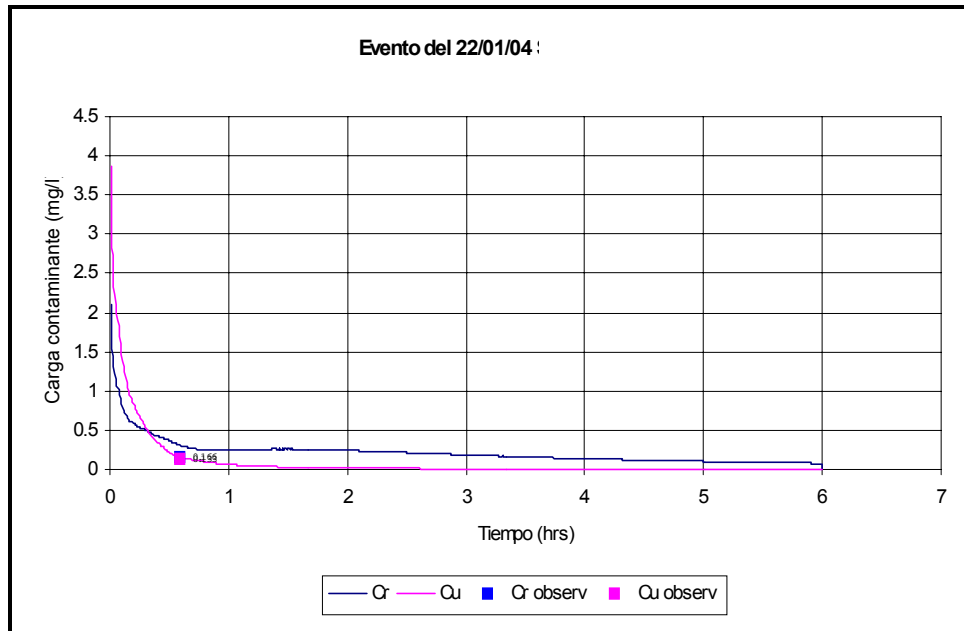


Figura 9. Poluto grama en sección 1

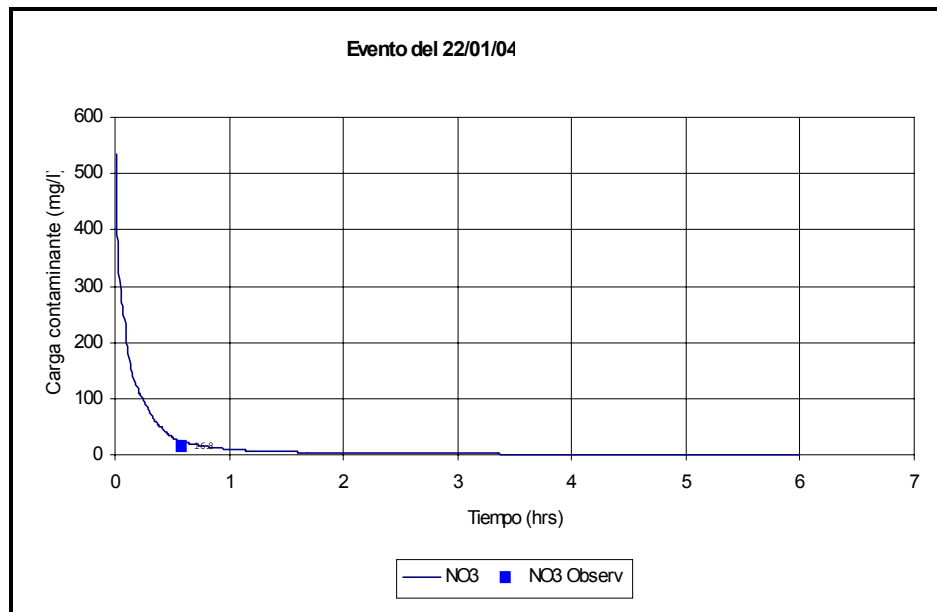


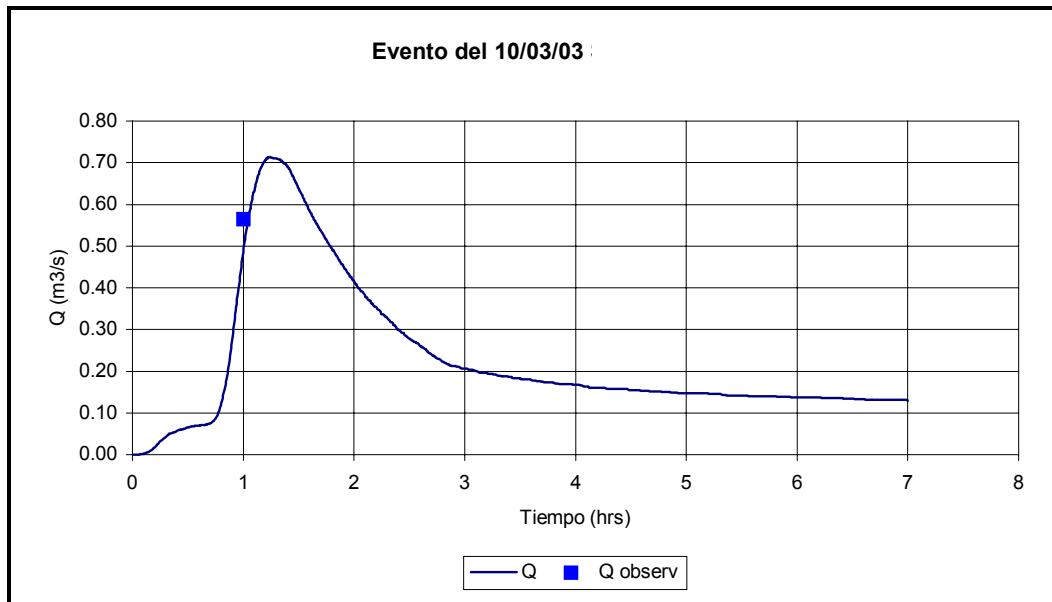
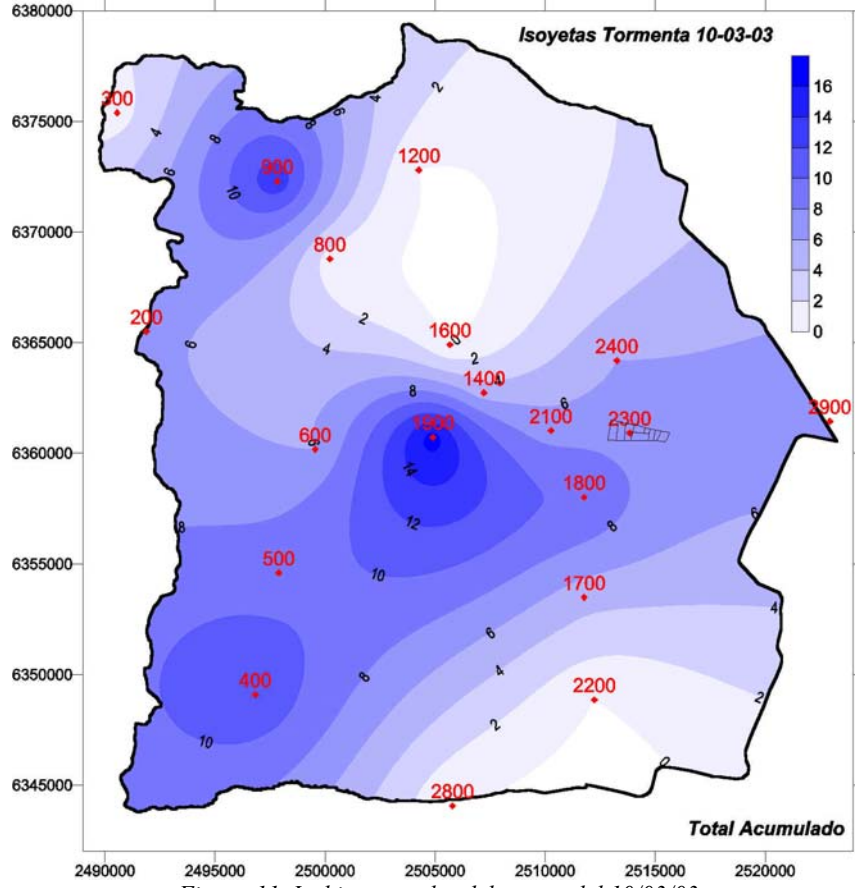
Figura 10. Poluto grama en sección 1

Validaciones

Sin modificar los parámetros calibrados se aplicó PCSWMM con los eventos del 10/03/03 y 12/01/04.

Resultados del evento del 10/03/03

Debido a problemas operativos en este evento, que fue el primero en que se realizaron mediciones, solamente se pudo obtener información en la sección 3.



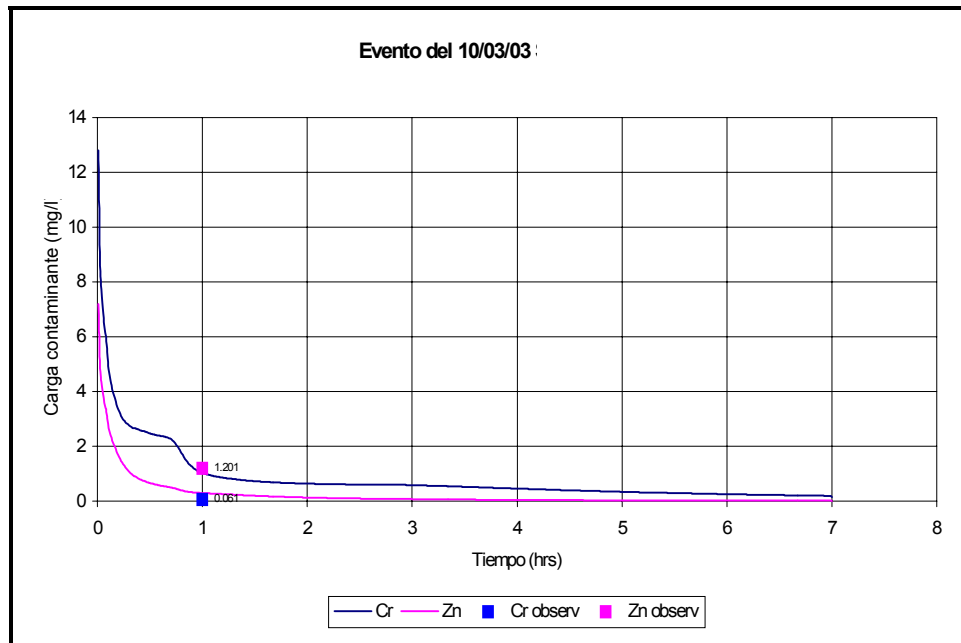


Figura 13. Poluto grama en sección 3

Resultados del evento del 12/01/04

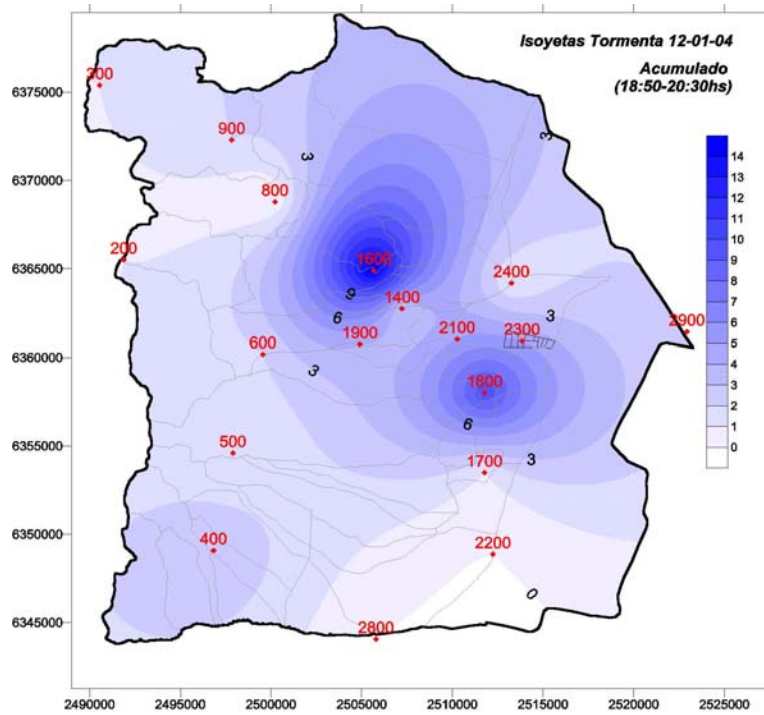


Figura 14. Isohietas totales del evento del 12/01/04

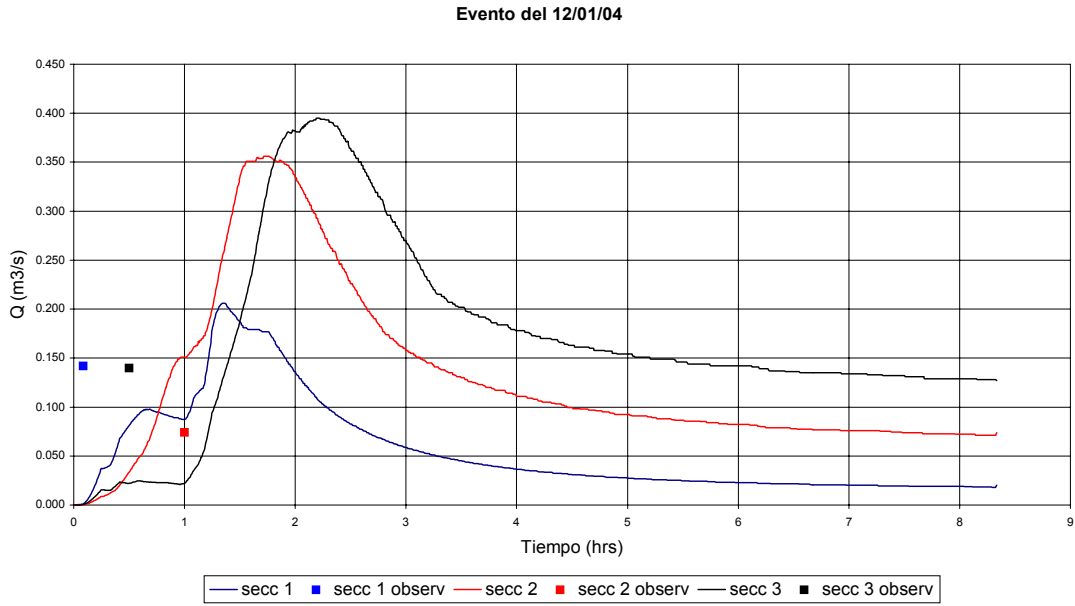


Figura 15. Hidrograma en secciones 1, 2 y 3

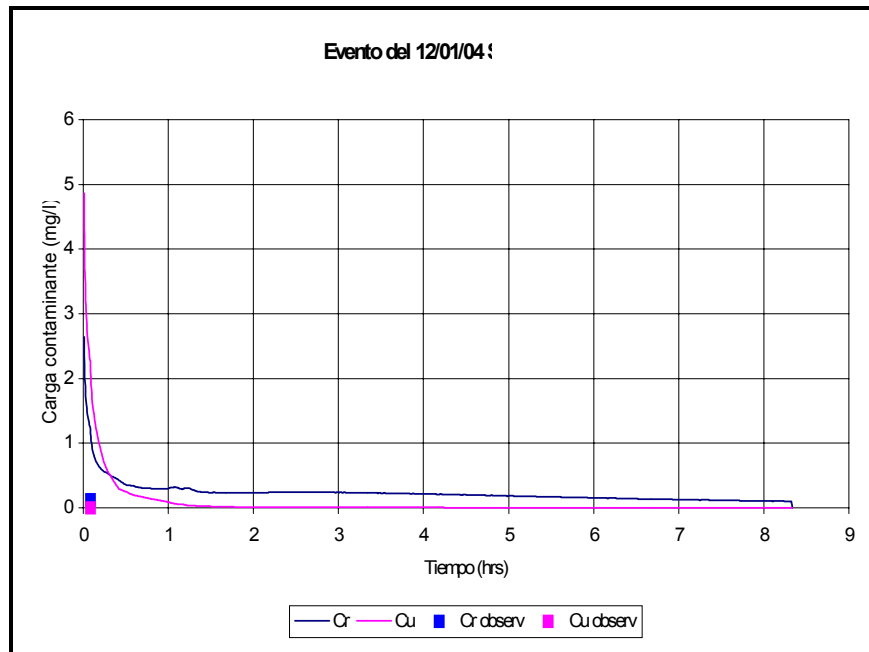


Figura 16. Poluto grama en sección 1

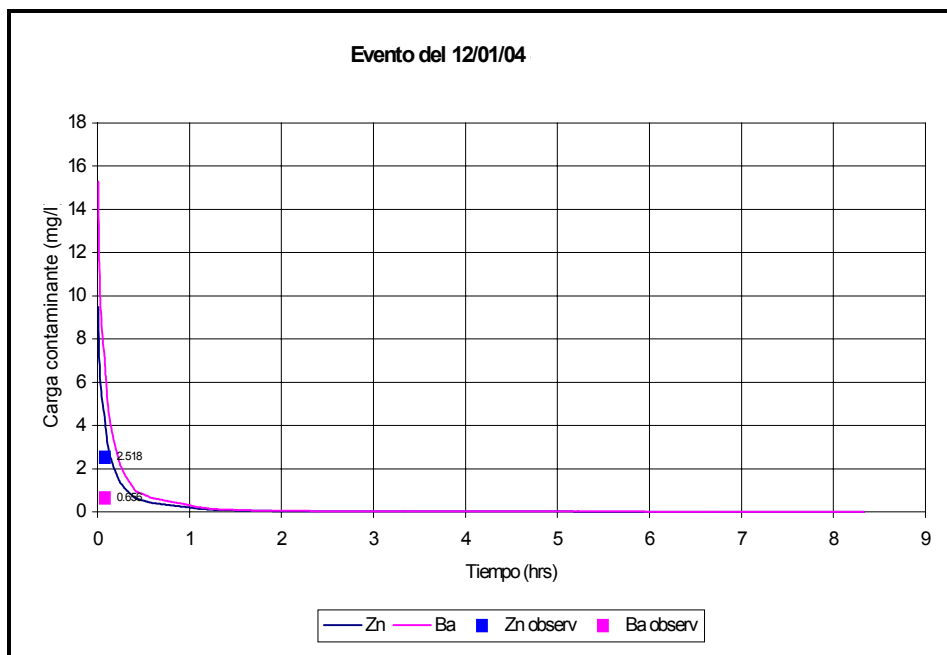


Figura 17. Poluto grama en sección 1

Análisis de los resultados

En las figuras 18 a 20 se muestran las correlaciones entre valores (caudales y concentraciones de contaminantes) observados y calculados y su posición relativa a la recta 1:1. Es evidente, en general, una sobrestimación de los valores calculados sobre los observados.

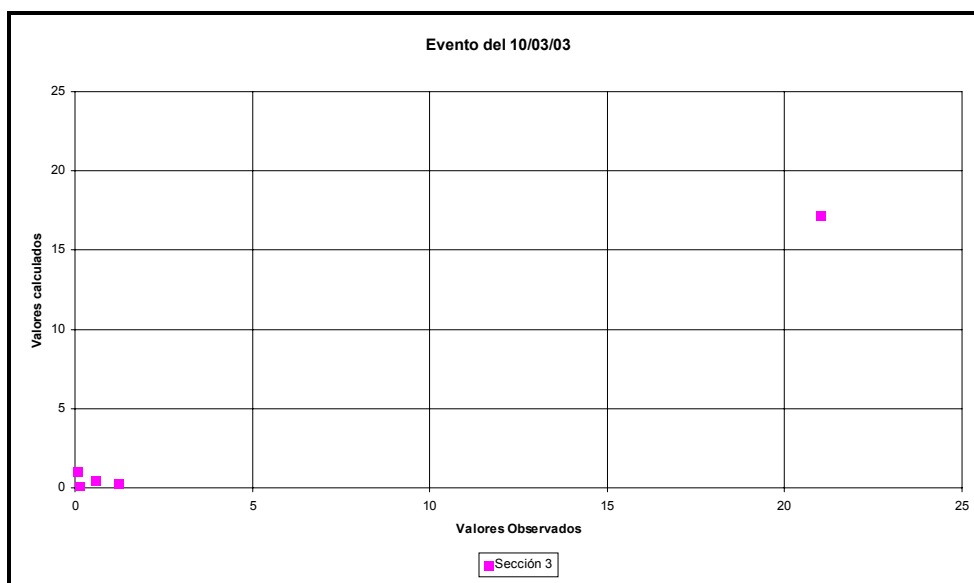


Figura 18. Evento del 10/03/03

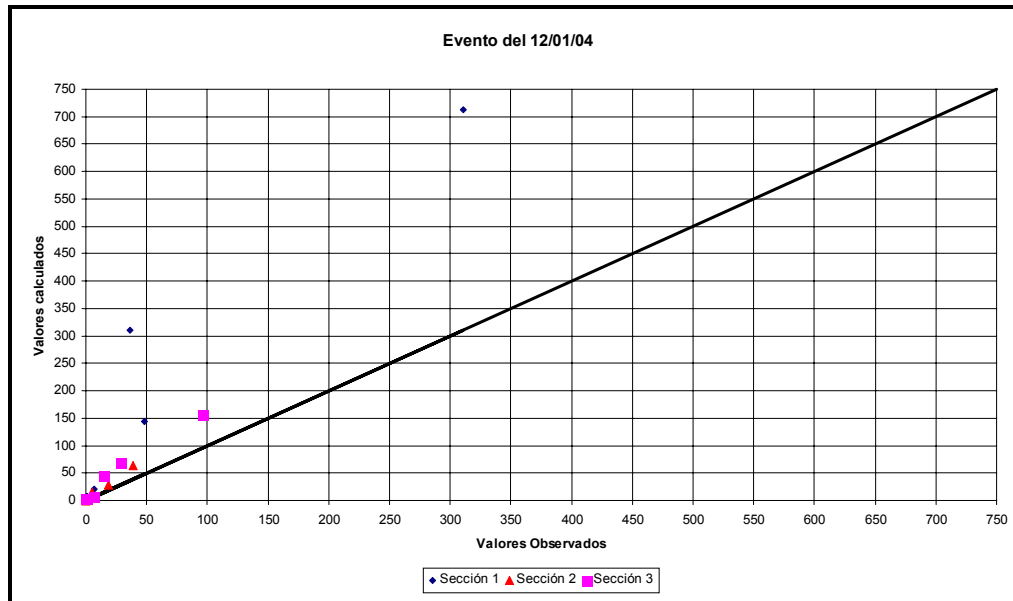


Figura 19. Evento del 12/01/04

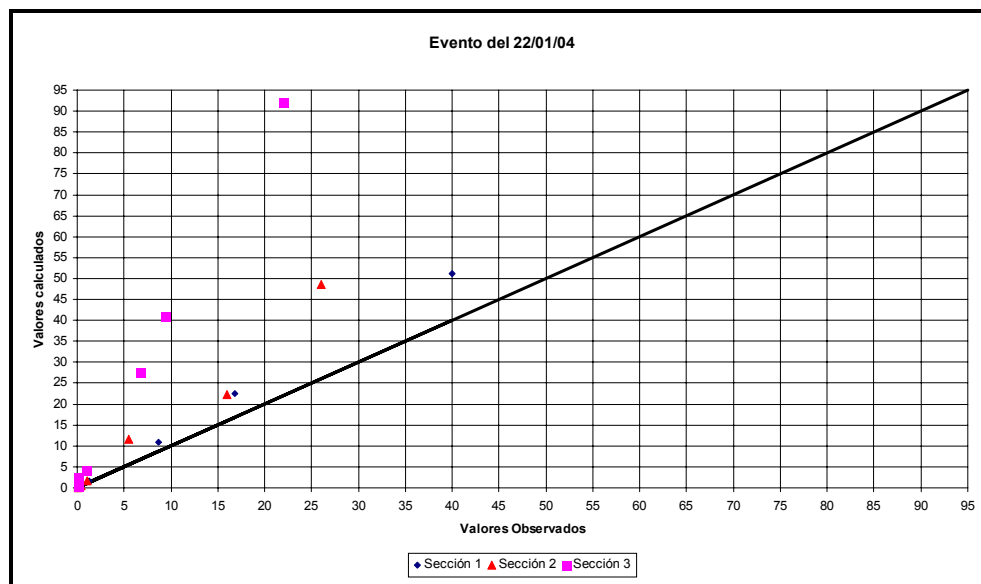


Figura 20. Evento del 22/01/04

La magnitud de los errores se puede explicar por los siguientes efectos:

- Al no ser el área de estudio una cuenca cerrada y definida en sus límites como divisorias de agua se producen aportes desde otros sectores urbanos y fugas del escurrimiento por otros puntos distintos del que se ha considerado como salida.
- La imposibilidad de lograr calibraciones aceptables en los parámetros vinculados a la simulación de contaminantes.

En la Figura 21 se muestra la proporción con que cada uso del suelo participa de la producción de cada contaminante. Para su cálculo se realizó un procedimiento iterativo en función de las superficies de cada uso del suelo y la cantidad de contaminante en cada punto de observación.

Se puede concluir que el uso del suelo “departamentos” es el que proporcionalmente más participa en la producción de todos los contaminantes, salvo en el cobre donde el uso del suelo “casas” es el predominante. Esta situación se da a pesar de que el uso del suelo “departamentos” es el 24% del área total, pero, lógicamente, es el que posee un mayor valor de producción de residuos por Km. de cordón.

Simulación del evento con precipitación de TR=2 años

Con la finalidad de conocer el efecto que produciría una precipitación mucho más intensa que las de los eventos medidos se determinó el caudal que puede conducir la calle en donde se encuentra la sección de observación 3 (salida del área de estudio) para un tirante de 0,30 m sobre el nivel de vereda . Tal caudal fue de 31, 5 m³/s , luego se pudo verificar que el caudal producido por el evento de TR= 2 años (**Tormenta de Proyecto, desarrollada por el INA en base a mediciones de lluvias en el pedemonte del Gran Mendoza**) en esa sección es de 34,33 m³/s , y que produce un tirante sobre vereda de 0,33 m.

En la Figura 22 se pueden observar el hietograma correspondiente a la precipitación de TR= 2 años y los hidrogramas generados por PCSWMM en las secciones de observación.

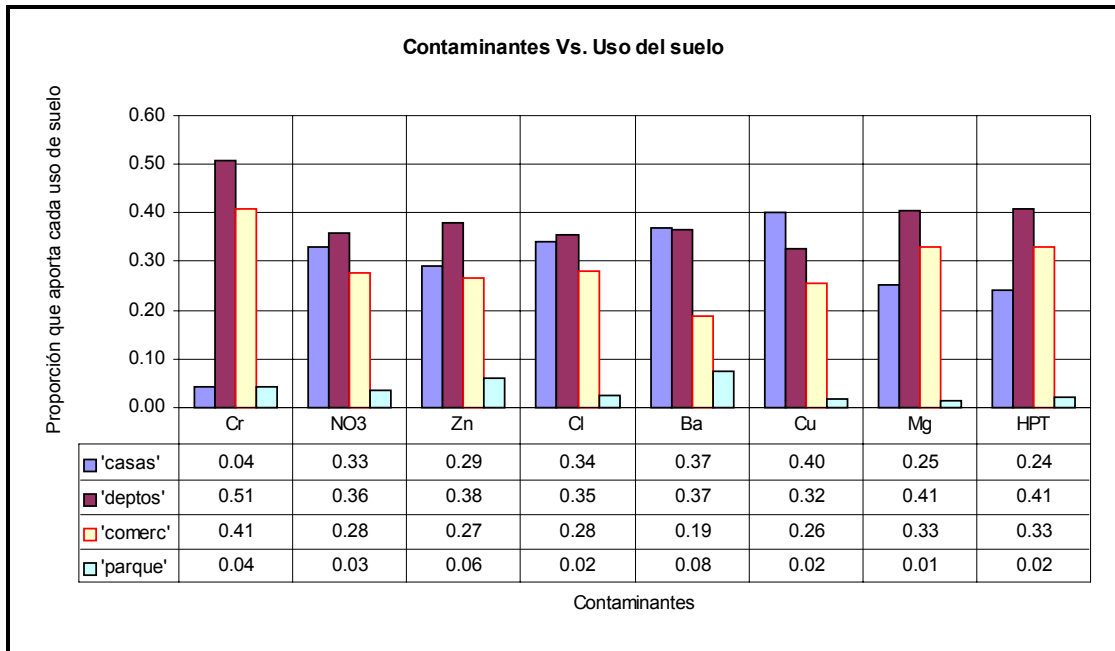


Figura 21. Relación entre contaminantes y usos del suelo.

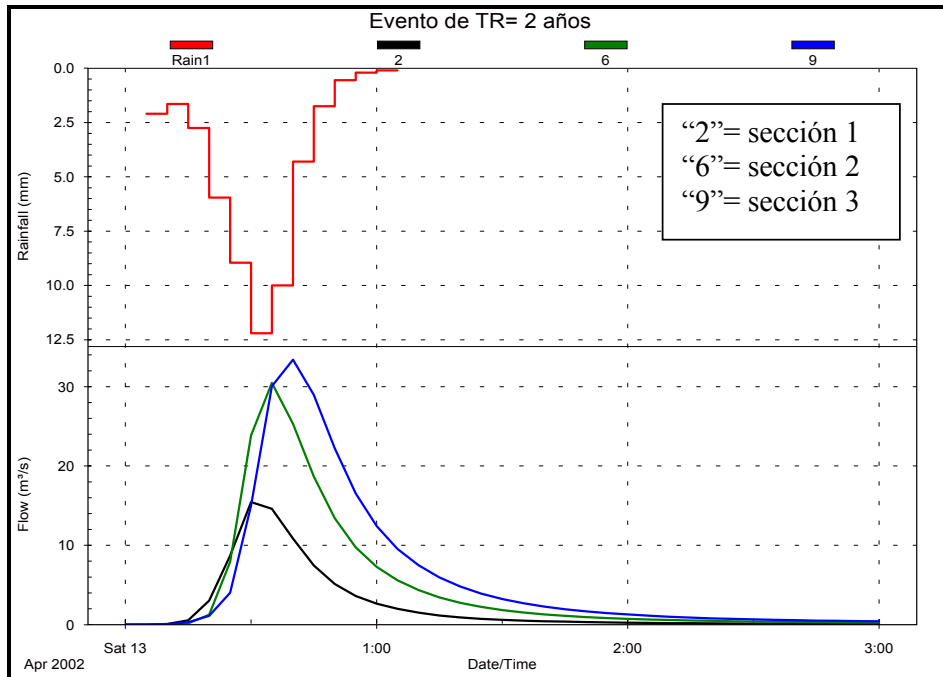


Figura 22. Evento con TR= 2 años

En las figuras 23 y 24 se pueden apreciar algunos de los poluto gramas en las secciones de observación de los contaminantes considerados.

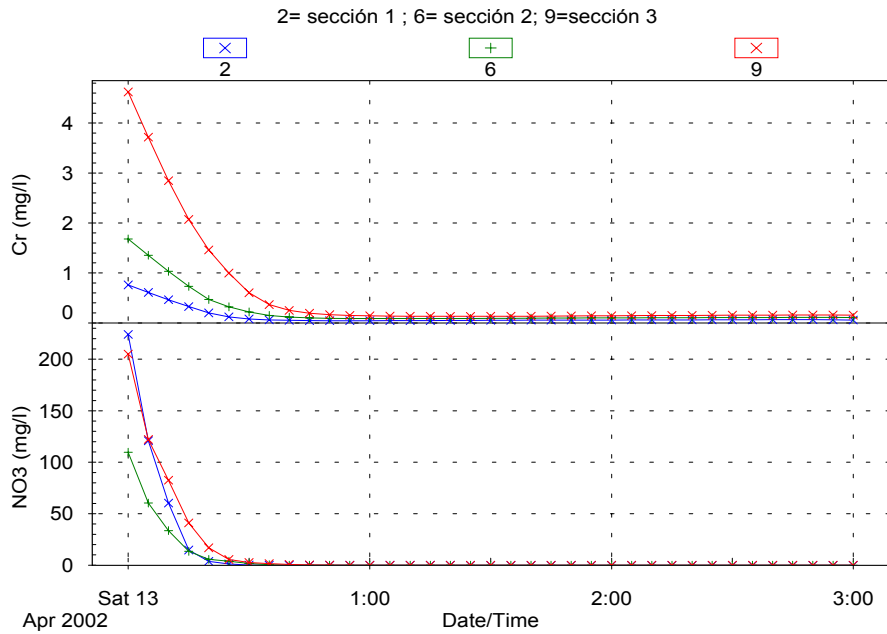


Figura 23. Evento con TR= 2 años

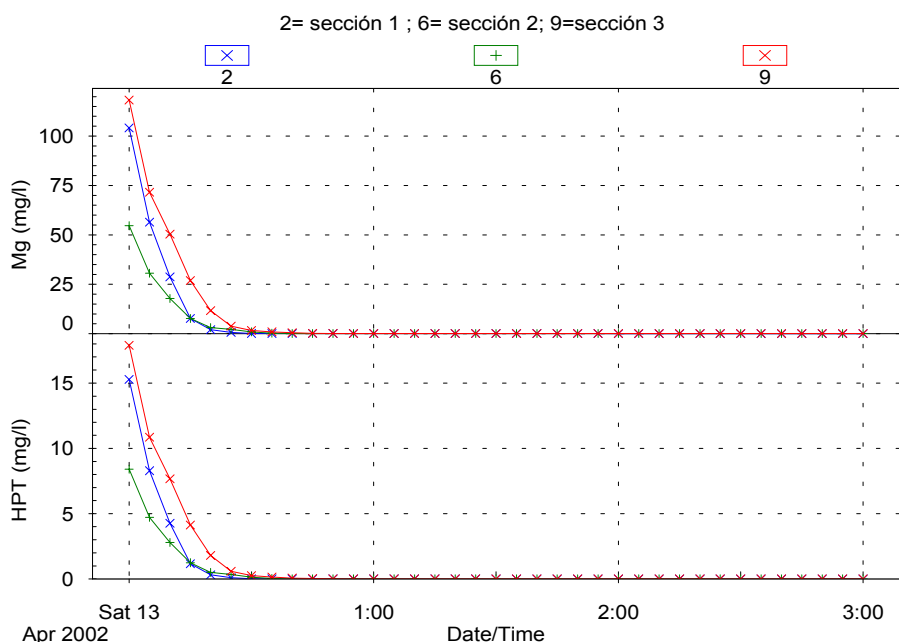


Figura 24. Evento con TR= 2 años

CONCLUSIONES

En la Tabla 10 se han resumido el volumen y lámina de la escorrentía generada por cada uno de los eventos, como también la carga total en Kg. que barre el escurrimiento hasta la salida del área de estudio (sección de observación 3).

Tabla 10. Volumen, lámina de la escorrentía y carga total

| EVENTO | VOLUMEN | ESCURRIM | CARGAS TOTALES | | | | | | | |
|----------|----------------|----------|----------------|-------|------|--------|------|------|-------|------|
| | | | Cr | NO3 | Zn | Cl | Ba | Cu | Mg | HPT |
| | m ³ | mm | kg | kg | kg | kg | kg | kg | kg | kg |
| 10/03/03 | 5730 | 2.48 | 3.67 | 46.10 | 0.78 | 101.00 | 0.99 | 0.27 | 27.00 | 4.36 |
| 12/01/04 | 5040 | 1.99 | 3.21 | 43.90 | 0.74 | 96.30 | 0.95 | 0.25 | 25.60 | 4.04 |
| 22/01/04 | 2630 | 0.87 | 1.62 | 33.70 | 0.56 | 74.50 | 0.73 | 0.20 | 19.30 | 2.99 |
| TR= 2 | 65600 | 36.88 | 15.40 | 52.40 | 0.89 | 115.00 | 1.13 | 0.30 | 30.80 | 4.90 |

En la Tabla 11 se detallan las concentraciones medias y máximas para cada evento considerado de cada uno de los contaminantes y su comparación con las normas del Departamento General de Irrigación (D.G.I.) de Mendoza. Es de resaltar que para las concentraciones medias el cromo y los hidrocarburos parafínicos totales (HPT) superan la mencionada normativa en los eventos medidos. En el caso de las concentraciones máximas la normativa es superada por todos los contaminantes en todos los eventos.

Tabla 11. Concentraciones de contaminantes

| PROMEDIO DURANTE EL EVENTO | | | | | | | | |
|--------------------------------|------------|-----------|-------|------------|-------|-------|--------|------------|
| EVENTO | Cr | NO3 | Zn | Cl | Ba | Cu | Mg | HPT |
| | mg/l | mg/l | mg/l | mg/l | mg/l | mg/l | mg/l | mg/l |
| 10/03/03 | 0.641 | 8.050 | 0.136 | 17.636 | 0.174 | 0.046 | 4.715 | 0.761 |
| 12/01/04 | 0.637 | 8.712 | 0.147 | 19.111 | 0.188 | 0.050 | 5.080 | 0.802 |
| 22/01/04 | 0.616 | 12.819 | 0.212 | 28.338 | 0.277 | 0.076 | 7.341 | 1.137 |
| TR= 2 | 0.235 | 0.799 | 0.014 | 1.754 | 0.017 | 0.005 | 0.470 | 0.075 |
| NORMAS DGI | 0.5 | 45 | | 200 | | | | 0.5 |
| MAXIMO VALOR DURANTE EL EVENTO | | | | | | | | |
| EVENTO | Cr | NO3 | Zn | Cl | Ba | Cu | Mg | HPT |
| | mg/l | mg/l | mg/l | mg/l | mg/l | mg/l | mg/l | mg/l |
| 10/03/03 | 12.80 | 485.00 | 7.19 | 1104.00 | 9.46 | 3.14 | 279.00 | 42.20 |
| 12/01/04 | 16.10 | 611.00 | 9.05 | 1391.00 | 11.90 | 3.96 | 352.00 | 53.20 |
| 22/01/04 | 14.00 | 534.00 | 7.91 | 1215.00 | 10.40 | 3.46 | 308.00 | 46.50 |
| TR= 2 | 7.34 | 279.00 | 4.13 | 635.00 | 5.44 | 1.81 | 161.00 | 24.30 |

Haciendo con PCSWMM un análisis de sensibilidad de los parámetros vinculados a la limpieza de las calles se pudo concluir:

- Cuando aumenta la eficiencia de limpieza de las calles (parámetro RFFDD) la concentración media en el evento (CME) de todos los contaminantes considerados disminuye a razón de 11,7 % por 0,1 de incremento de eficiencia.
- Cuando se considera el tiempo transcurrido desde la última limpieza (DSLCL) para el comienzo de la precipitación, en el caso de que la frecuencia de limpieza (CLFREQ) sea cada dos días, la CME aumenta a razón de 38 % por día de tiempo transcurrido desde la última limpieza. Si CLFREQ= 1 día la CME disminuye 20% con respecto a cuando CLFREQ= 2 días

Las simulaciones realizadas en este estudio distan de ser concluyentes para tomar cualquier tipo de decisiones estructurales y/o no-estructurales. El proyecto tuvo carácter de “demostrativo”, y desde esa visión se puede rescatar:

- Las concentraciones de los contaminantes que se muestran en la Tabla 7 revelan información inédita para la región.
- Las mediciones de calidad de agua de escurrimiento pluvial en los tres eventos son llamativos, dado que en algunos casos se determinaron valores de concentraciones que superan a las normas del Departamento General de Irrigación.
- Las herramientas de simulación utilizadas son válidas para este tipo de análisis.
- Es necesario realizar campañas de medición sistemáticas para poder contar con información concluyente sobre esta problemática, y poder calibrar herramientas de simulación que luego pueden ser útiles para generar otros escenarios distintos del actual y así poder planificar.

AGRADECIMIENTOS

Los autores recuerdan con afecto al Qco. Hugo Alfredo Loustaunau que falleció en diciembre de 2003 y que realizó importantes contribuciones para la concreción del presente trabajo.

Este trabajo fue financiado por ANPCyT - FONCyT (PICT98 13-04120).

BIBLIOGRAFÍA

- Biesecker, J., L. Scott Tucker, D.R. Dawdy, M. Mc Pherson.** *Guide for collection, analysis, and use of urban stormwater data.* 1976
- Chen, Carl W.** *Water quality analysis of urban runoff.* USA, 1975.
- Computational Hydraulics International.** *PCSWMM.* Canadá, 2003
- Fornero L., A. Pavese, J. Maza, D. Vega** “*Actualización del Modelo Hidrológico ARHYMO*”. Libro de Resúmenes del XIX Congreso Nacional del Agua, págs. 49-50. Carlos Paz, Córdoba, agosto 2002.
- Geiger, W., J. Marsalek, W.J. Rawls, F.C. Zuidema.** *Manual on drainage in urbanized areas - Vol 2. Data collection and analysis for drainage design.* UNESCO. 1987
- James W., James, R.C. (ed.)** *Hydrology. A guide to the rain, temperature and runoff modules of the USEPA SWMM4.* Computational Hydraulics International. Canadá, 2001.
- Jiménez Gallardo B.R.** *Contaminación por escorrentía urbana.* Colegio de Ingenieros, caminos canales y puertos. Colección SEINOR N° 22, España, 1999.
- Montt, J.P.** *Antecedentes empíricos y modelación de la calidad de las aguas lluvias urbanas.* Tesis para el grado de Magister en Cs. De la Ingeniería. Escuela de Ingeniería, Pontificia Univ. Católica de Chile. Chile, 2000.
- Roesner, L.A. (co-chair)** *Urban runoff quality management.* ASCE's Manual and Report on Engineering Practice N° 87, WEF's Manual of Practice N° 23. USA, 1998.
- Whipple, W., N. Grigg, T. Grizzard, C. Randall, R. Shubinski, I. Scott Tucker** *Stormwater management in urbanizing areas.* 1983