

XII Simposio Iberoamericano sobre planificación de sistemas de abastecimiento y drenaje
“REGULACIÓN DE EXCEDENTES PLUVIALES EN CUENCAS URBANAS”

Ing. Alejandro Secchi (1), Ing. Rosana Mazzón (2)

**(1) Instituto Nacional del Agua-CRL, Patricio Cullen 6161,54-03424605910,
alejandroantoniosecchi@gmail.com**

(2) Instituto Nacional del Agua-CRL, Patricio Cullen 6161, 54-0342 4605910, rmazzon@ina.gov.ar

RESUMEN

La mayoría de las grandes ciudades argentinas vienen sufriendo recurrentes inundaciones, como producto del incremento de sus áreas impermeabilizadas y la consiguiente incapacidad de la red de drenaje pluvial para evacuar las aguas excedentes.

El objetivo de este trabajo consistió en analizar, mediante simulación matemática, utilizando el modelo Storm Water Management Model (SWMM), la implementación de dispositivos reguladores de caudales en bocas de tormenta, y dispositivos domiciliarios en una subcuenca urbana de la ciudad de Santa Fe, con el fin de cuantificar los volúmenes totales necesarios a almacenar, para que el conducto existente trabaje sin producir anegamientos.

Palabras claves: Drenaje pluvial, Regulación de caudales, medidas estructurales y no estructurales, Argentina.

ABSTRACT

Most large cities in Argentina have suffered recurrent flooding as a result of the increase in their waterproofed areas and the consequent inability of the storm drainage system to evacuate the excess water.

The aim of this study was to analyze through mathematical simulation, using the SWMM model, the implementation of flow regulating devices in storm drains and home devices on a Santa Fe city urban subbasin in order to quantify the total volumes required to store for the existing duct work without causing flooding.

Key words: Stormwater drainage, flow control, structural and nonstructural measures, Argentina.

SOBRE EL AUTOR PRINCIPAL

Ingeniero en Recursos Hídricos – Egresado en Marzo de 1981- UNL Universidad Nacional del Litoral - Santa Fe-Argentina.

Especializado en Hidrología Urbana y Previsión de crecidas en Francia- Entrenamiento de Post-Grado - Office de la Recherche Scientific e Technique Outre-Mer - ORSTOM. (Montpellier) - Universite des Sciences et Techniques du Languedoc (Montpellier)- Bureau de l'Eau - Meteorologie Nationale (París)- Service Hydrologique Centralisateur de la Garonne (Toulouse) becado por el Programa Global de Ciencia y Tecnología. Subprograma INCYTH-BID- 1986

Cursos de Posgrado sobre Hidrología Urbana y Modelación matemática

INTRODUCCIÓN

La mayoría de las grandes ciudades argentinas vienen sufriendo recurrentes inundaciones como producto del incremento de sus áreas impermeabilizadas y la consiguiente incapacidad de la red de drenaje pluvial en evacuar las aguas excedentes.

Dado el crecimiento de tipo centrífugo que presentan las ciudades, los caudales excedentes generados por las nuevas áreas impermeabilizadas aguas arriba deben atravesar la red de colectores de los sectores más antiguos de la ciudad. Cuando la capacidad de transporte de la red se ve superada, las aguas atraviesan las ciudades superficialmente generando inundaciones.

El enfoque tradicional para encarar el problema del escurrimiento de las aguas pluviales en cuencas urbanas consiste en evacuar todos los volúmenes generados en forma rápida a las redes existentes. Esta pauta de diseño ha ido cambiando poco a poco, admitiéndose que la disminución del escurrimiento posee numerosas ventajas. Las técnicas aplicadas durante las últimas décadas para el control de inundaciones se basan fundamentalmente en el retardamiento del escurrimiento mediante sistemas de almacenamiento o infiltración.

Con el fin de contribuir a las soluciones de tipo estructural (aquellas relacionadas con la ejecución de obras) y no-estructural (normativas) al problema de las inundaciones pluviales en áreas urbanas, el Instituto Nacional del Agua (INA) ha desarrollado un programa de trabajo específico en este tema. El mismo comprende fundamentalmente el diseño y experimentación de dispositivos reguladores de caudales y las propuestas de reglamentación de aplicación correspondientes.

Uno de los objetivos principales de este estudio fue analizar mediante la aplicación de un modelo matemático hidrológico – hidráulico la aplicación de los dispositivos de regulación de los caudales picos desarrollados por el INA en una subcuenca perteneciente a la cuenca Guadalupe Oeste de la ciudad de Santa Fe.

En el marco de este objetivo general, se tienen los siguientes objetivos particulares:

- Simular matemáticamente la implementación de dispositivos reguladores de caudales en bocas de tormenta y dispositivos domiciliarios en una subcuenca urbana de la ciudad de Santa Fe con el

fin de cuantificar los volúmenes totales necesarios a almacenar para que el conducto existente trabaje sin producir anegamientos.

- Determinación del efecto total de laminación en la cuenca estimando el amortiguamiento de los caudales picos, a partir de modelación hidrológica – hidráulica considerando la implementación de dispositivos reguladores tanto en boca de tormenta como domiciliarios.
- Simular el funcionamiento interno del dispositivo en boca de tormenta utilizando el modelo SWMM (Storm Water Management Model) de libre acceso, con la finalidad de realizar transferencia de resultados y aplicaciones.
- Medición de niveles en una sección de control del conducto principal de la subcuenca con el fin de evaluar la variabilidad de los parámetros de calibración del modelo SWMM para dicha escala.

SUBCUENCA URBANA EXPERIMENTAL

La subcuenca seleccionada, Regimiento 12 de Infantería, se ubica en la zona noreste de la cuenca Guadalupe Oeste, la superficie de la misma es de 25.54 ha, Figura N° 1.

Pertenece a la cuenca Guadalupe Oeste, que a su vez, se ubica en la zona noreste de la ciudad de Santa Fe, abarcando el barrio Guadalupe Oeste y parte de Guadalupe Este, con una superficie aproximada de 200 ha.

El uso predominante del suelo es de tipo residencial unifamiliar con algún uso comercial, industrial y espacios abiertos.

Esta subcuenca viene sufriendo un proceso de urbanización que se evidencia por un incremento importante del área impermeable.

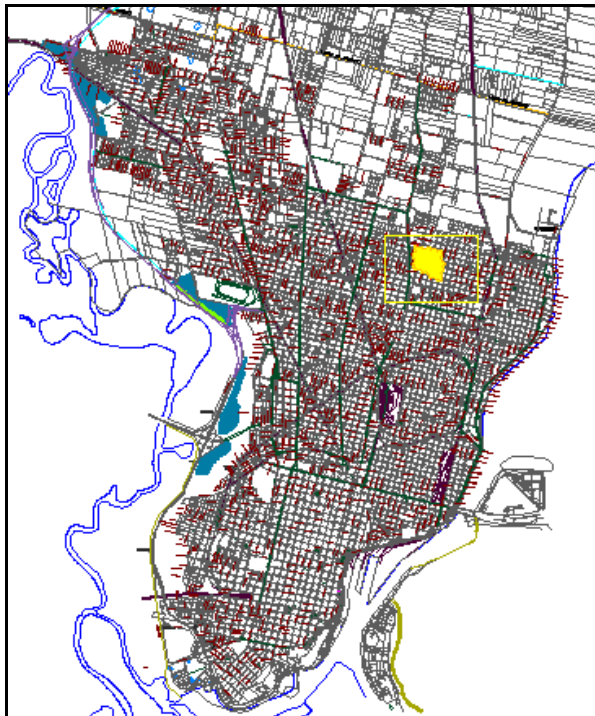


Figura N° 1: Ubicación subcuenca

DISPOSITIVOS REGULADORES DE CRECIDAS

La función de este tipo de dispositivos es disminuir los caudales máximos antes que ingresen a los conductos de desagüe pluvial. Es decir que estos dispositivos permiten, mediante una trampa hidráulica, “cortar” los picos de las crecidas, almacenarlos y retenerlos hasta que la red existente vuelva a tener capacidad de conducción y no produzca anegamientos.

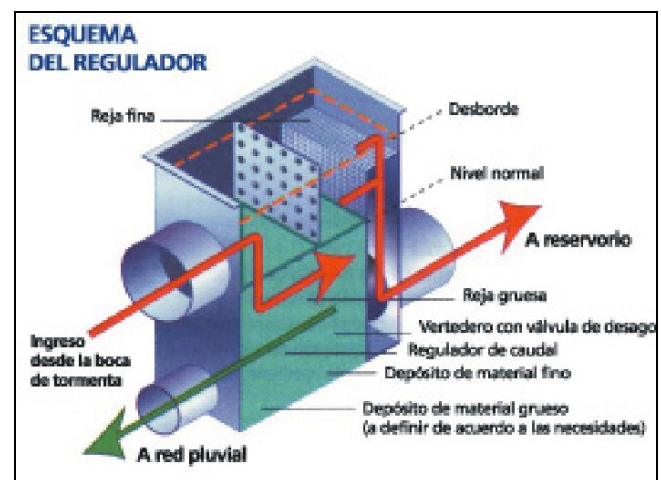
Cabe destacar que estos dispositivos fueron ensayados en laboratorio, experimentados en cuenca y los resultados muy satisfactorios fueron presentados en distintos eventos científicos internacionales.

REGULADOR TIPO PARA BOCA DE TORMENTA

El dispositivo regulador de crecidas en cuencas urbanas fue desarrollado, experimentado y patentado por el INA, y actualmente es fabricado por INDUPAG S.A., mediante un convenio enmarcado en la Ley de Innovación Tecnológica que vincula los organismos de investigación y las empresas privadas. El dispositivo actúa sobre los caudales antes que ingresen a los conductos de desagüe, ver Croquis N° 1.

En función de la capacidad actual de la red existente o del conducto en estudio, se determina el grado de insuficiencia para conducir los excesos generados para una tormenta de diseño seleccionada.

En base a este cálculo y a la densidad de bocas de tormenta necesarias en la red, se diseñan los dispositivos para que generen los porcentajes de laminación y desembalse buscados para cada boca de tormenta, con el fin de que combinados en el sistema pluvial se logren los efectos de atenuación acorde a la insuficiencia de la red existente. De esta forma, se buscan evitar total o parcialmente los anegamientos, de acuerdo a las necesidades del proyecto.



Croquis N° 1: Dispositivo regulador en boca de Tormenta

REGULADOR TIPO DOMICILIARIO

La regulación se puede conseguir en diferentes escalas y con diferentes niveles de intervención, para la regulación a nivel de predio ha sido desarrollado el dispositivo domiciliario.

Este constituye una sola pieza de tamaño reducido y bajo costo, que puede ir empotrado en la pared o en el exterior dependiendo de las condiciones constructivas del edificio y debe ir acoplado a una conducción que derive los caudales calculados para amortiguamiento hacia el reservorio, ver Foto N° 1.

La descarga de los techos escurre por el tubo de bajada y en su extremo inferior ingresa al accesorio de regulación



Foto N° 1: Dispositivo regulador domiciliario para bajada de techos

INSTRUMENTAL HIDROMETEOROLÓGICO

Con el fin de medir los niveles alcanzados en los diferentes eventos meteorológicos se efectivizó la compra de un limnógrafo a flotador marca TECMES TS1300.

El limnógrafo se instaló en proximidades de la intersección de las calles Regimiento 12 de Infantería y Alvear, en una casilla que sirve de protección contra intrusos y agentes atmosféricos

El sensor (flotador) se ubico en una cámara quietadora, construida con un caño de P.V.C. perforado de 0.40 m de diámetro, la cual está vinculada al conducto principal de calle Regimiento 12 de Infantería. Ver Figura N° 2.

La función del sensor (flotador) es la de medir los cambios de nivel en el conducto principal, estos niveles asociados a las tormentas que permitirán calibrar el modelo matemático.

Para la adquisición de datos se programó el limnógrafo con un paso de tiempo $dt=5$ min. Con el fin de optimizar el uso de la memoria sólida solamente se graban los datos de niveles una vez que en el flotador se comienzan a producir cambios en el nivel.

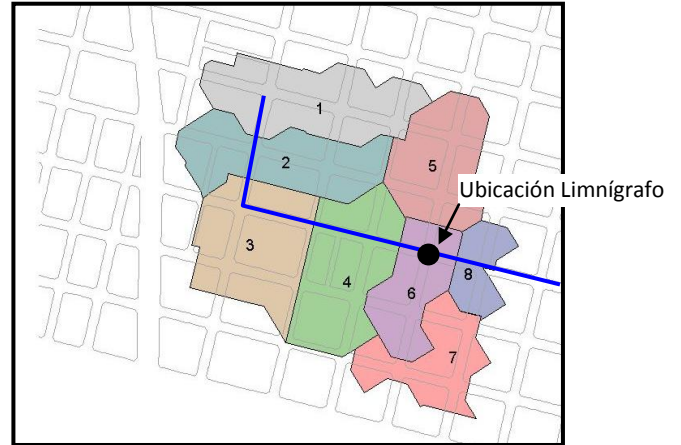


Figura N° 2

DESCRIPCIÓN GENERAL DEL MODELO

El SWMM de la EPA es un modelo dinámico de simulación de precipitaciones en alcantarillados urbanos, se lo utiliza para eventos aislados o para simulación continua.

Se desarrollo por primera vez en 1971, la versión utilizada para este proyecto corresponde a la 5a versión del programa, es un código reescrito funcionando bajo entorno Windows.

Cuenta con dos módulos fundamentales, el modulo hidrológico que funciona como una serie de cuencas donde se produce la transformación lluvia - escorrentía a partir de la simulación de diferentes procesos.

Y un modulo hidráulico, que analiza el recorrido de estas aguas a través de un sistema de tuberías, canales, dispositivos de almacenamientos y tratamiento, bombas y elementos reguladores. A fin de mantener uniformidad entre los trabajos que se presenten para el Congreso, éstos deberán tener como mínimo los siguientes acápite sin numeración.

APLICACIÓN DEL MODELO SWMM. SIMULACIÓN FUNCIONAMIENTO DISPOSITIVO

Se conformaron los archivos de entrada y se realizo la simulación matemática del funcionamiento interno del dispositivo considerando descarga libre tomando como input el hidrograma de ingreso con

que se realizaron los ensayos hidráulicos en laboratorio.

Se realizaron varias corridas hasta lograr el ajuste del hidrograma de salida del dispositivo obtenido a partir de la modelación, con el hidrograma obtenido en los ensayos hidráulicos realizados en el Laboratorio de la Facultad de Ingeniería y Ciencia Hídricas para diferentes coeficientes de descarga de orificio, observar Gráfico N° 1.

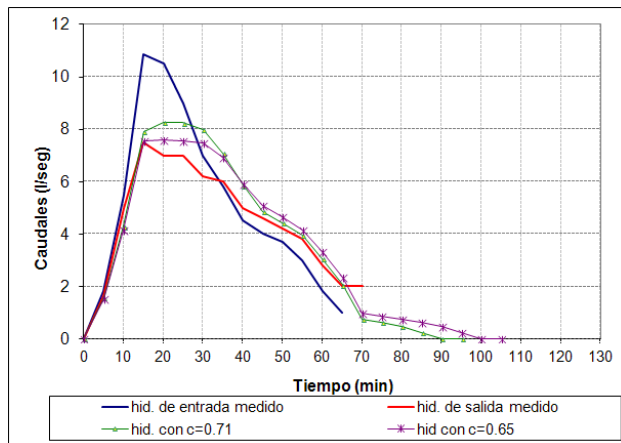


Gráfico N° 1

REGULACION MODULO TECHOS

Una vez obtenido un ajuste del modelo SWMM en la simulación del funcionamiento interno del dispositivo, se procedió a calcular matemáticamente un hidrograma modulo de techos, por cada cuarto de manzana (por cuadra). Este hidrograma es producto del escurrimiento generado por 10 techos de 86 m² y es el hidrograma de ingreso al dispositivo.

Para la obtención del área de este modulo se siguió el razonamiento que se explica a continuación:

El área impermeable total promedio de toda la subcuenca es de 69.5 %, y se considera que el 50 % de este área corresponde a techos, o sea un 34.75 %. Considerando el área de una manzana en 10000 m², esto quiere decir que 3475 m² corresponden a techos. Se considero como hipótesis de trabajo que cada manzana está ocupada por 40 techos (10 por cuadra), resultando un área media de 86 m² por techo.

Luego se calculó el hidrograma de ingreso al dispositivo domiciliario, correspondiente a 10 techos simulados en conjunto, con una pendiente media del 3.5 %.

Mediante la simulación interna detallada anteriormente se obtuvo hidrograma producido por y

regulado por 10 techos y para una tormenta de diseño de $t_r=2$ años y 1 hora de duración, ver Gráfico N° 2.

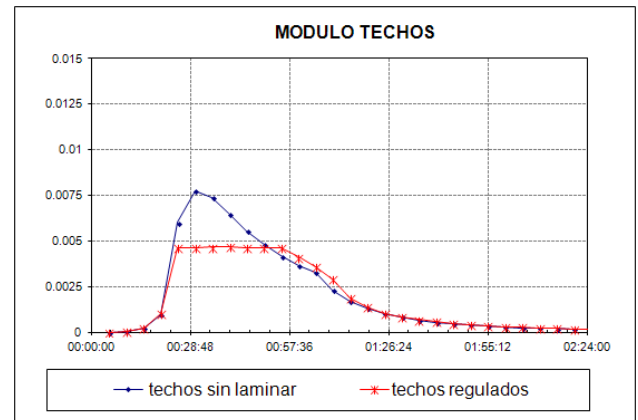


Gráfico N° 2

APLICACIÓN DEL MODELO SWMM A LA SUBCUENCA EXPERIMENTAL

Se implementó el modelo SWMM a toda la subcuenca Regimiento 12 y una vez generados y relacionados los archivos de datos con la información física necesaria se procedió a la calibración del mismo. En la figura N° 3 se muestra el esquema topológico del modelo SWMM.

En los Gráficos N° 3,4 se muestra uno de los eventos lluviosos medidos y utilizados como inputs en la simulación hidrológica-hidráulica de la subcuenca.

En el Gráfico 5 se muestra el limnigrama medido en el conducto principal durante el evento lluvioso mencionados y el simulado matemáticamente. En los gráficos mencionados se observa que el ajuste logrado es aceptable para los objetivos del estudio.

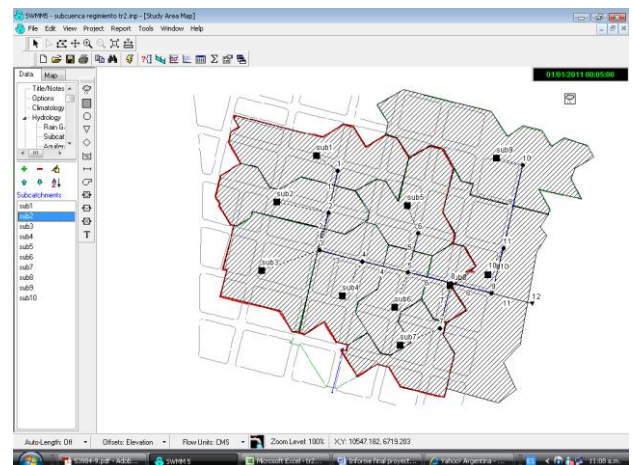


Figura N° 3

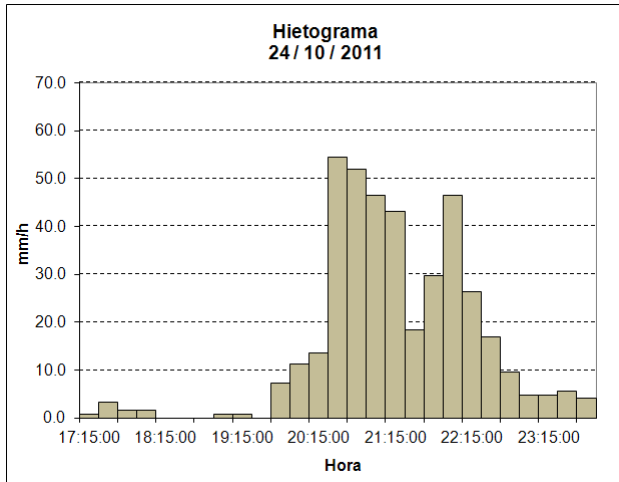


Gráfico Nº 3

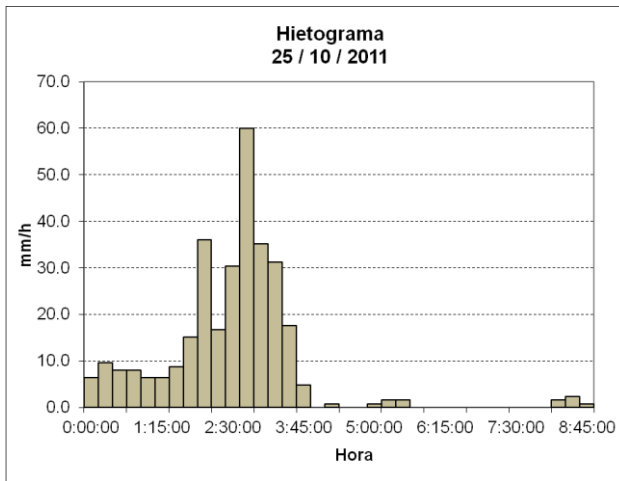


Gráfico Nº 4

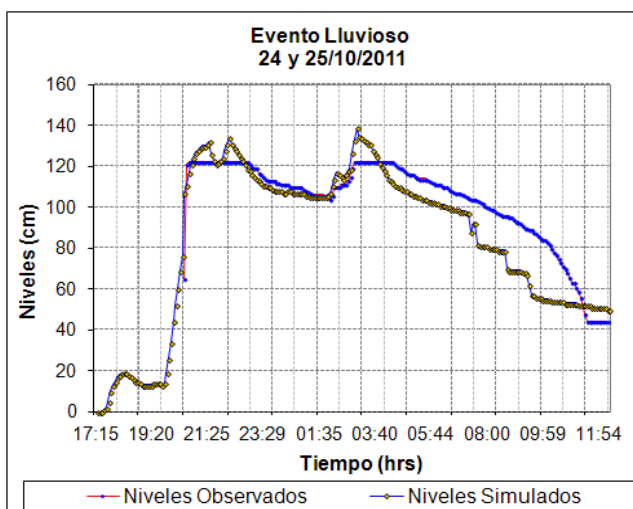


Gráfico Nº 5

EVALUACIÓN DE ALTERNATIVAS DE REGULACIÓN MEDIANTE SIMULACIÓN MATEMÁTICA

Una vez realizado el ajuste del modelo para situación actual de la subcuenca experimental, se procedió a simular matemáticamente para una tormenta de proyecto ($t_r=2$ años - Estación Paraná, una hora de duración y $dt=5$ min, ver Gráfico Nº 6), las siguientes alternativas de regulación:

1. Modelación de la subcuenca con regulación distribuida domiciliaria
2. Modelación de la subcuenca con regulación distribuida en boca de tormenta
3. Modelación de la subcuenca con regulación distribuida en boca de tormenta y domiciliaria

Se generaron los archivos del modelo SWMM para todas las alternativas planteadas.

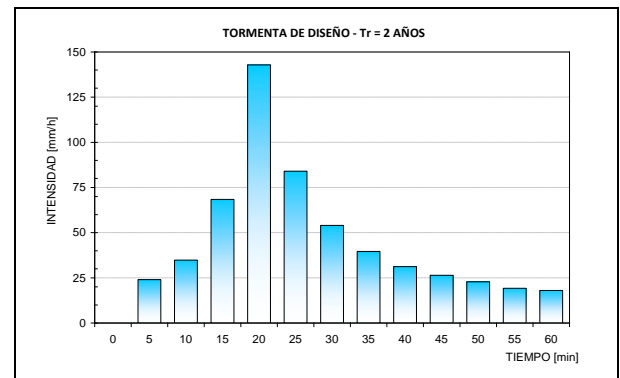


Gráfico Nº 6

MODELACION DE LA SUBCUENCA CON REGULACION DISTRIBUIDA DOMICILIARIA (EN TECHO)

Se modeló para la misma tormenta de diseño, considerando los hidrogramas generados por los techos (los cuales fueron regulados con los dispositivos domiciliarios), más los generados por las calles, más los aportes de la porción permeable de cada subcuenca.

Estos fueron los inputs en los nodos correspondientes a la red de desagües existentes, los cuales fueron trasladados y agregados hacia aguas abajo considerando descarga libre en el nodo final. Ver Figura Nº 4.

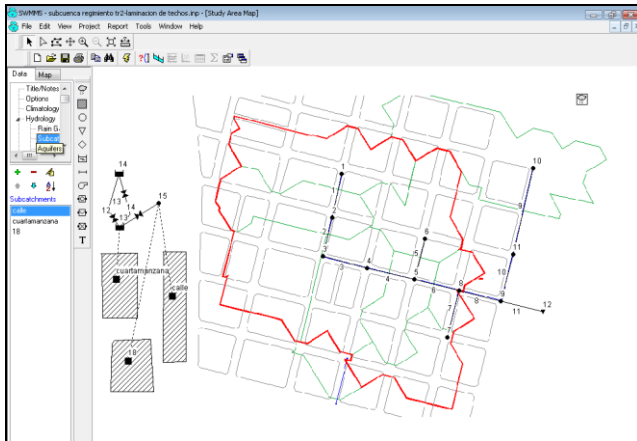


Figura N° 4

MODELACION DE LA SUBCUENCA CON REGULACION CON DISTRIBUIDA EN BOCA DE TORMENTA

Se modelo para la misma tormenta de diseño, calculándose los hidrogramas generados por cada subcuenca. Estos se consideraron como inputs en la simulación interna de los dispositivos reguladores en boca de tormenta obteniéndose los hidrogramas regulados. Los mismos fueron trasladados e integrados hacia aguas abajo, considerando descarga libre en el nodo final, obteniéndose el hidrograma total con regulación en bocas de tormenta, ver Figura N° 5.

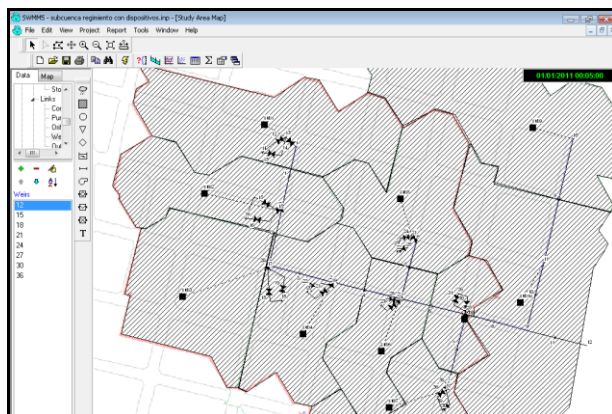


Figura N° 5

MODELACION DE LA SUBCUENCA CON REGULACION DISTRIBUIDA EN BOCA DE TORMENTA Y DOMICILIARIA.

Se modelo para la misma tormenta de diseño, considerando los hidrogramas generados por los techos ya regulados, más los generados por las calles, más los aportes por la porción permeable de cada subcuenca.

Los hidrogramas totales regulados en los techos fueron los inputs a los dispositivos reguladores en boca de tormenta.

Por último los hidrogramas regulados en boca de tormenta se consideraron como ingreso a la red de drenaje existente, los mismos se trasladaron e integraron hacia aguas abajo, considerando descarga libre en el nodo final, obteniéndose el hidrograma total resultante de las dos alternativas de regulación combinadas en techos y bocas de tormenta.

RESULTADOS

En el Gráfico N° 7 se muestran los hidrogramas totales resultantes de la modelación para cada una de las alternativas de regulación descriptas anteriormente.

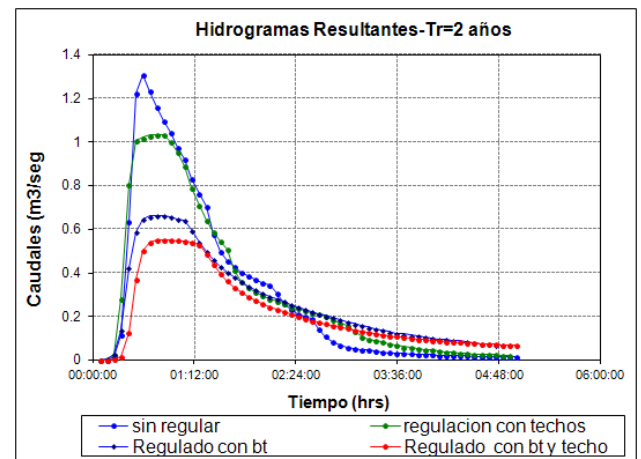


Gráfico N° 7

En las Tablas N° 1,2 y 3 se muestra un resumen de los resultados obtenidos por subcuenca para cada una de las alternativas analizadas.

Tabla N° 1

SUB	AREA (Has)	IMP(%)	TECHOS				
			Qptotal (m3/seg)	Qptechos (m3/seg)	% laminación	vol.total m3	volumen por ha
SUB1	4.25	62	0.19	0.149	22	39	9.2
SUB2	3.7	65	0.184	0.149	19	35	9.5
SUB3	4.14	71	0.23	0.176	23	49	11.8
SUB4	3.97	71	0.243	0.2	18	53	13.4
SUB5	3.3	60	0.195	0.16	18	42	12.7
SUB6	2.4	75	0.148	0.128	14	34	14.2
SUB7	2.52	77	0.176	0.14	20	38	15.1
SUB8	1.26	74	0.07	0.05	29	14	11.1

Tabla Nº 2

SUB	AREA (Has)	IMP(%)	BOCAS DE TORMENTA			
			QpBT (m3/seg)	% laminacion	vol. total (m3)	volumen por ha (m3)
SUB1	4.25	62	0.08	58	176	41.4
SUB2	3.7	65	0.1	46	156	42.2
SUB3	4.14	71	0.13	43	182	44.0
SUB4	3.97	71	0.152	37	164	41.3
SUB5	3.3	60	0.13	33	82	24.8
SUB6	2.4	75	0.095	36	99	41.3
SUB7	2.52	77	0.12	32	70	27.8
SUB8	1.26	74	0.049	30	55	43.7

Tabla Nº 3

SUB	AREA (Has)	IMP(%)	TECHOS + BOCAS DE TORMENTA			
			Qptechos+bt (m3/seg)	% laminacion	vol. total m3	volumen por ha
SUB1	4.25	62	0.076	60	241	56.7
SUB2	3.7	65	0.074	60	185	50.0
SUB3	4.14	71	0.083	64	311	75.1
SUB4	3.97	71	0.092	62	281	70.8
SUB5	3.3	60	0.087	55	131	39.7
SUB6	2.4	75	0.072	51	110	45.8
SUB7	2.52	77	0.084	52	96	38.1
SUB8	1.26	74	0.033	53	77	61.1

Del análisis de resultados presentados, puede observarse que:

- La tabla Nº 1 muestra que regulando los caudales picos por subcuenca en un 20 % promedio, con la implementación de los dispositivos reguladores domiciliarios, es necesario un almacenamiento de 12.1 m3 por ha, (es decir por por manzana). Esto implica que se necesitan 300 litros de capacidad de reserva por cada techo simulado en la cuenca.
- La tabla Nº 2 muestra que regulando los caudales picos por subcuenca en un 39 % promedio, con la implementación de dispositivos reguladores en boca de tormenta, es necesario un almacenamiento de 38 m3 por ha (por manzana).
- La tabla Nº 3 muestra que regulando los caudales picos en un 57 % promedio, con la implementación de los dispositivos reguladores en techos más los dispositivos en boca de tormenta, son necesarios en total 55 m3 por ha (por manzana), repartidos entre los dispositivos domiciliarios y en boca de tormenta, lográndose un resultado similar a la suma de los volúmenes resultantes de las dos alternativas de regulación implementadas por separado.

CONCLUSIONES GENERALES DEL ESTUDIO

En el presente proyecto se han cumplido los principales objetivos planteados, a través de la implementación de un modelo matemático

hidrológico – hidráulico (SWMM) con el fin de simular el funcionamiento de los dispositivos de regulación de los caudales picos desarrollados por el INA en una subcuenca perteneciente a la cuenca Guadalupe Oeste de la ciudad de Santa Fe, validándose las corridas del modelo mediante registros pluviométricos e hidrométricos medidos en el transcurso de este estudio.

Se simuló matemáticamente distintas alternativas de implementación de dispositivos reguladores de caudales en bocas de tormenta y dispositivos domiciliarios, en forma separada y combinada en la subcuenca, lográndose la cuantificación de los volúmenes totales necesarios a almacenar para que el conducto principal existente trabaje sin producir anegamientos para la tormenta de diseño seleccionada.

Analizando los resultados en conjunto puede observarse que con la regulación combinada se logran mayores porcentajes de disminución de los caudales picos, que con la regulación efectuada con los sistemas de bocas de tormenta y techos en forma separada.

Un aspecto muy importante que se desprende del análisis de los resultados es que, para la cuenca estudiada es necesario almacenar solo el 10 % del total de lluvia precipitada, para lograr una disminución de los caudales máximos en el orden del 50 %. Es decir, el caudal máximo que debe descargar el conducto principal se reduce a la mitad por efecto de la regulación implementada.

Esta reducción de caudales implica que una cuenca con una red de desagüe deficitaria puede ser recuperada en términos de proyecto con estas alternativas de solución, sin necesidad de ampliación y reposición de los conductos pluviales existentes.

Hay que remarcar también que la aplicación de la regulación puede realizarse en forma separada o combinada dependiendo del nivel de incapacidad hidráulica del sistema y de la inversión a realizar. Esta inversión puede ser pública, como en el caso de la aplicación de los dispositivos en bocas de tormenta a través de fondos municipales, o bien, de inversiones privadas con la aplicación de los dispositivos de regulación domiciliarios en la regulación de predios particulares.

Con respecto a la calidad del agua pluvial urbana y para el caso específico del fenómeno estudiado que es el denominado Lavado Inicial de la cuenca, se

destaca el buen funcionamiento del captador diseñado, desarrollado e implementado en el presente proyecto, lo cual permitió obtener las muestras necesarias del agua pluvial en bocas de tormenta.

Los resultados obtenidos a partir de los muestreos mencionados, permiten concluir que la mayoría de los contaminantes analizados están por debajo de los límites admitidos, salvo los sólidos suspendidos, que superan ampliamente los límites establecidos en la reglamentación existente.

Lo mencionado coincide con las experiencias internacionales en este tema y pone en evidencia que los esfuerzos con respecto al tratamiento de la calidad del agua pluvial urbana, deberán estar dirigidos a la retención y tratamiento de los sólidos presentes en el escurrimiento pluvial.

Maza J., Fornero L., Litwin C., Fernández P., (1996). ARHYMO. Versión 2.0. Instituto Nacional de Ciencia y Técnica Hídricas – Centro Regional Andino, Mendoza.

BIBLIOGRAFIA

- Chow VT Maidment d y Mays L. (1994). Hidrología Aplicada. Mc Graw-Hill
- Heras, R (1972). Manual de Hidrología (T8), Dirección General de Obras Hidráulicas, Centro de Estudios Hidrográficos, Madrid.
- Orsolini H.E, Zimmermann E.D., Basile P.A. (2008). Hidrología, Procesos y Métodos. UNR.
- Nanía L.S., Gómez V.M. (2006). Ingeniería Hidrológica. Grupo Editorial Universitario.
- Wisner P., P'ng. C. (1986). OTTHYMO: Un modelo matemático para Planificación de Sistemas Maestros de Drenaje. Universidad de Ottawa, Canadá.
- Calomino F., Maksimović Ć., Molino B., (1995). Urban Drainage: Experimental Catchments in Italy. Bios. Cosenza. Italia.
- Iriondo M.H. (2010) Las aguas Superficiales y Subterráneas de la Provincia de Santa Fe.
- Rahmane I. Polución de Aguas Pluviales Urbanas. Municipalidad de Córdoba.
- Pepro Montt Monckeberg J. (2000). Antecedentes Empíricos y Modelación de la Calidad de Las Aguas de Lluvias Urbanas. Santiago de Chile.
- Bailleux A., Conil L. Recuperation Des Eaux Pluviales. Universite Montpellier. France
- Pedraza R. (2002). OCRED-1: "Un Modelo Lluvia Escorrentía Basado en las Ecuaciones de la Onda Cinemática Versión 1.0, Serie de publicaciones I+D, Facultad de Ingeniería y Ciencias Hídricas, Universidad Nacional del Litoral.