



## LA MODELACIÓN COMO INSTRUMENTO DE PLANIFICACIÓN TERRITORIAL CASO DE APLICACIÓN: ARROYO MIGUELETE, MONTEVIDEO.

### **Martínez Penadés, Juan Pablo (\*)**

Ingeniero Civil H/A, título expedido por Facultad de Ingeniería de la Universidad de la República en 2006. Ingeniero de Estudios y Proyectos de Saneamiento de la Intendencia de Montevideo.

Dirección del autor principal (\*): Uruguayana 3430/8 – Montevideo – Uruguay. Tel. 099216785. e-mail: [juanmartinezpenades@gmail.com](mailto:juanmartinezpenades@gmail.com)

### **RESUMEN**

En este trabajo se presenta una aplicación de modelación hidrodinámica para el principal arroyo urbano de la ciudad de Montevideo. Se presenta la metodología utilizada, así como sus principales usos y aplicaciones, entre los que se destacan: mapa de amenaza a escala 1:10.000 con zonas por período de retorno para todo el tramo urbano, evaluación de remansos producidos por puentes y evaluación del desfasaje de hidrogramas rurales y urbanos.

Se muestra también como el modelo pasa a formar parte de las herramientas de gestión y proyecto disponibles por la Intendencia, permitiendo autorizar o ajustar proyectos, en particular de realojos de viviendas, de cruce de tuberías y de rellenos de planicies.

Se ha demostrado también la posibilidad de realizarlo con el personal y herramientas disponibles por una oficina ajena al ambiente académico y con recursos humanos y económicos limitados. Lo adecuada de la metodología se muestra comparando los bajos costos de implementación con los beneficios obtenidos y potenciales.

**Palabras clave:** Gestión del riesgo, HEC-RAS, Inundación, Modelación.

### **INTRODUCCIÓN**

El Arroyo Miguelete es uno de los principales cursos de agua de la ciudad de Montevideo, tiene una longitud de 18 Km. y un área de aporte de más de 100 km<sup>2</sup>. En el año 1942 una de las peores inundaciones que se registraron en la ciudad motiva la ampliación y revestido del cauce del arroyo en un tramo de más de 2.5 Km. Estos trabajos fueron acompañados por la parquización de estos tramos, generando uno de los parques más grandes de la ciudad.

En las décadas siguientes las zonas no parquizadas son ocupadas por población de muy bajos recursos que utilizan el Arroyo para el descarte de la clasificación de basura. Las industrias y el propio saneamiento de la ciudad también producen un fuerte deterioro de sus aguas.



Figura 1.- Vista de zona de parques y de asentamientos sobre el cauce.

En la década de 1990 se comienza un largo proceso de recuperación del arroyo. Se disminuyen los vertimientos de saneamiento y de industrias mediante la construcción de obras de saneamiento, se erradican basurales endémicos, y se realojan varios asentamientos. Las zonas que ocupaban los asentamientos son recuperados para el uso público mediante parquización. De esta forma se evita que estos espacios vuelvan a ocuparse con nuevos asentamientos. En mayo de 2003 se aprueba el Plan Especial del Arroyo Miguelete que articula todas estas acciones y propone la estrategia a seguir: mantener y potenciar el carácter natural de la cuenca alta y continuar la estrategia de realojo – parquización en todo el tramo urbano.

Las zonas a realojar se definían siguiendo los planos del proyecto 1942 y los datos de máximas crecientes conocidas. La utilización de estas herramientas sin lugar a dudas fue adecuada en las décadas pasadas, sin embargo la modernización de la técnica y las ventajas del uso de criterios basados en la probabilidad de recurrencia han justificado la actualización de las herramientas utilizadas.

En los últimos años se han popularizado las herramientas de modelación debido principalmente a la incorporación de éstos a la currícula de los cursos universitarios de grado y a la disponibilidad de software gratuito. Esto ha permitido que los modelos hayan dejado de ser herramientas reservadas al ambiente académico para pasar a ser herramientas cotidianas de gestión y de proyecto. En este marco es que la Intendencia de Montevideo realiza ésta modelación.

## PROCEDIMIENTO

La implementación del modelo se realiza en dos etapas. En una primera etapa se construye un modelo general del Arroyo que permite tener un conocimiento general de su comportamiento hidráulico: se identifican estrangulamientos del cauce, puentes inadecuados y se hace una delimitación aproximada de las áreas inundables entre otros.

Este primer modelo sirve de base para la segunda etapa, que es básicamente de gestión. Esporádicamente distintos agentes se proponen realizar acciones sobre el Arroyo o su cuenca. Dado que la Intendencia autoriza estas acciones debe tener disponible herramientas que le permitan evaluar pertinentemente las afectaciones que estas acciones puedan tener sobre las crecidas del Arroyo. Dependiendo de la intervención y del objetivo del análisis debe llegarse a resultados con menor o mayor detalle, lo que requerirá también menor o mayor detalle de la información de base a utilizar.

### **Etapas 1: Modelo general**

Para la modelación se generan tormentas según períodos de retorno que son transitados por las cuencas rurales y urbanas. Para estas últimas se utiliza el modelo hidrodinámico ya existente de la red de drenaje de la ciudad implementados sobre el software EPA-SWMM (Environmental Protection Agency -Storm Water Management Model). Una vez transitados estos caudales son ingresados al

modelo del Arroyo desarrollado en HEC-RAS del Hydrologic Engineering Center del US Army Corps of Engineers.

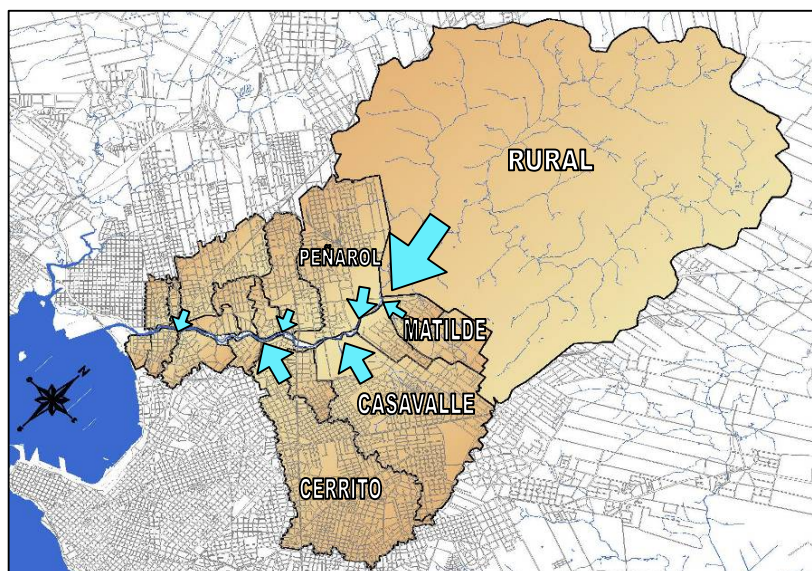


Figura 2.- Cuencas de aporte del Arroyo Miguelete.

Para la implementación del modelo en HEC-RAS se utiliza información de relevamientos antiguos y datos del proyecto de 1942 que son complementados con algunos relevamientos específicos de zonas en donde no se tenían datos o donde los datos disponibles no eran fiables. Para definir el coeficiente de manning del cauce y de la planicie se comparan sus características con los de bibliografía de referencia.

Los resultados obtenidos se comparan con datos históricos de niveles máximos alcanzados en puentes. En general presentan diferencias de menos de un metro, que resultan aceptables para los objetivos de esta etapa.

Una vez obtenidos los caudales y niveles para distintos períodos de retorno se arma el mapa de amenaza de inundación. Para esto se crea un modelo digital de terreno (MDT) a partir de las curvas de nivel cada 2 metros. Éste se corrige con datos de cotas de las tapas de los registros de la red de saneamiento o de otras fuentes disponibles en la Intendencia. Con este MDT y los niveles obtenidos del modelo hidrodinámico se realiza un plano de amenaza de inundación a escala 1:10.000.

Los niveles de amenaza considerados son tomados de las recomendaciones de la Dirección Nacional de Aguas. Para toda la zona por debajo del nivel correspondiente a los 100 años de período de retorno recomienda tomar “medidas tendientes a la liberación del espacio”<sup>1</sup>:

<sup>1</sup> Tomado de “Informe Síntesis. Equipo Consultor en Inundaciones y Drenaje Urbano”. Proyecto de Modernización de los Servicios Públicos del Banco Mundial. Diciembre de 2008.

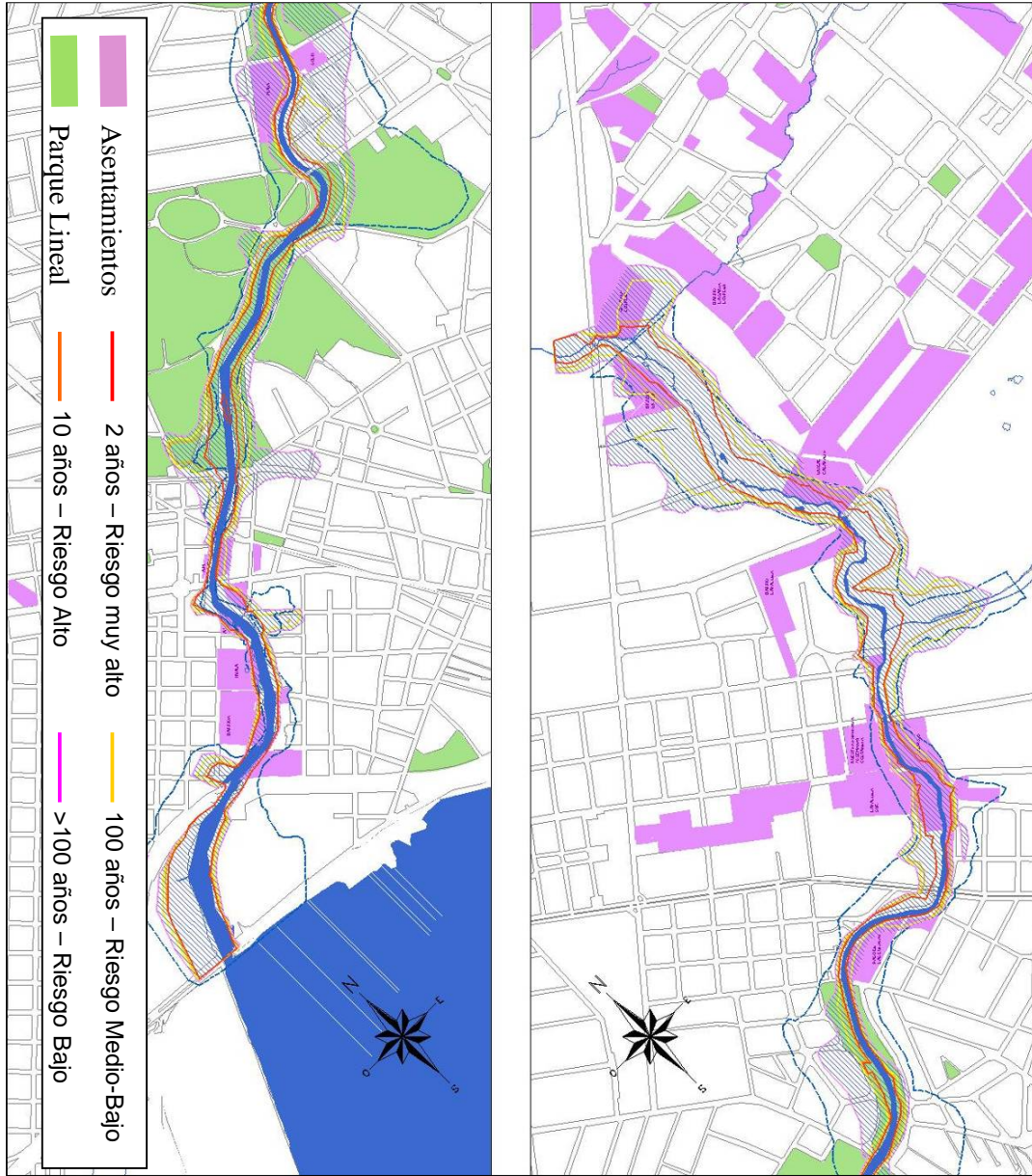


Figura 3.- Mapa de amenaza de inundación por desborde del Arroyo Miguelete.

Además de este producto se han realizado algunos estudios también generales sobre el funcionamiento del Arroyo.

- Evaluación de influencia de puentes
- Influencia de vegetación
- Identificación preliminar de viviendas en zonas inundables
- Desfasare de hidrograma urbano y rural

**Evaluación de influencia de puentes.-** Para evaluar la influencia que los puentes ocasionan en el flujo se realizan corridas del modelo con y sin puentes. De los 15 puentes considerados solo uno produce un remanso considerable. A pesar de que para la tormenta de Tr 100 años el remanso es de 800 metros y un metro de altura, como se encuentra en zonas parquizadas no produce afectaciones a viviendas.

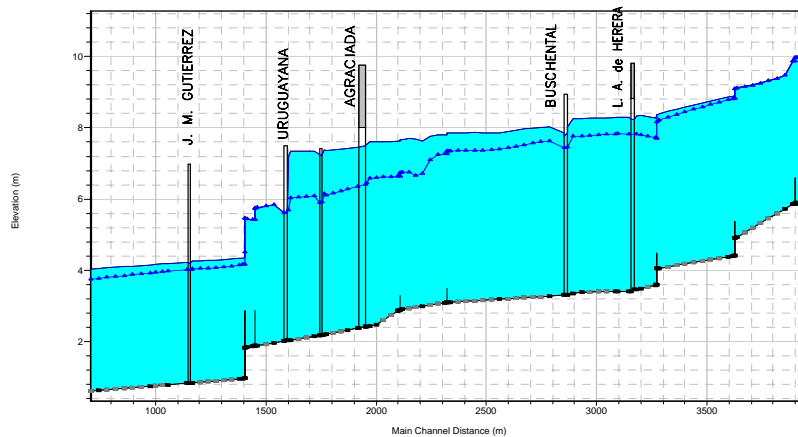


Figura 4.- Salida del modelo con niveles alcanzados con y sin puentes.

**Influencia de vegetación.-** Se analiza también el efecto de la vegetación sobre el flujo. Las zonas parquizadas mantienen los pastos cortos, sin embargo en los tramos no parquizados existe una vegetación muy densa. En la imagen siguiente se muestra el resultado de la modelación con vegetación densa y con pastos cortos para un tramo específico del arroyo ( $n=0.035$  y con vegetación densa  $n=0.2$ ).

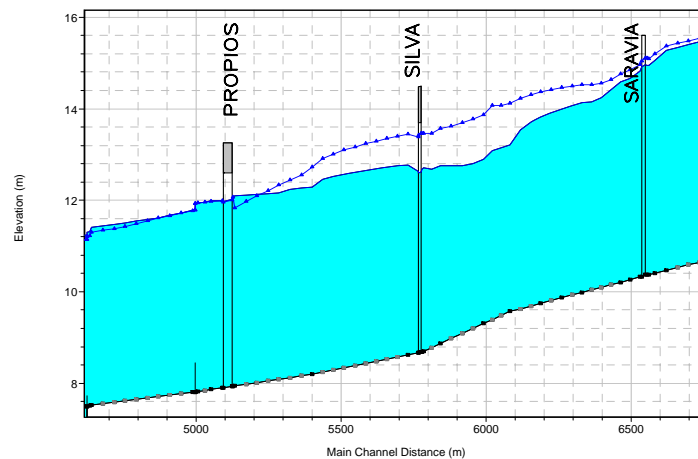


Figura 5.- Salida del modelo con y sin vegetación para zona de asentamientos.

El efecto en este tramo es entonces de aproximadamente un metro para una tormenta de período de retorno 100 años. Los asentamientos de esta zona presentan problemas de inundaciones, por lo que el mantenimiento de los pastos cortos podrían mitigar este efecto, disminuyendo la amenaza.

**Desfasaje de hidrogramas rurales y urbanos.-** El Arroyo Miguelete tiene la particularidad de que la cuenca baja se encuentra totalmente urbanizada, mientras que la cuenca alta permanece rural. Las cuencas urbanas, tienen tiempos de respuesta muchos más rápidos que las cuencas rurales, por lo que es factible que los picos de los hidrogramas entren desfasados al arroyo.

Del estudio se concluye que en este caso el desfasaje es parcial. En la imagen siguiente pueden verse hidrogramas obtenidos en distintas progresivas: Prog. 7800 donde solo entra la cuenca rural; Prog. 5800 cuando algunas cuencas menores comenzaron a aportar y en Prog. 0 correspondiente a la descarga en la Bahía de Montevideo.

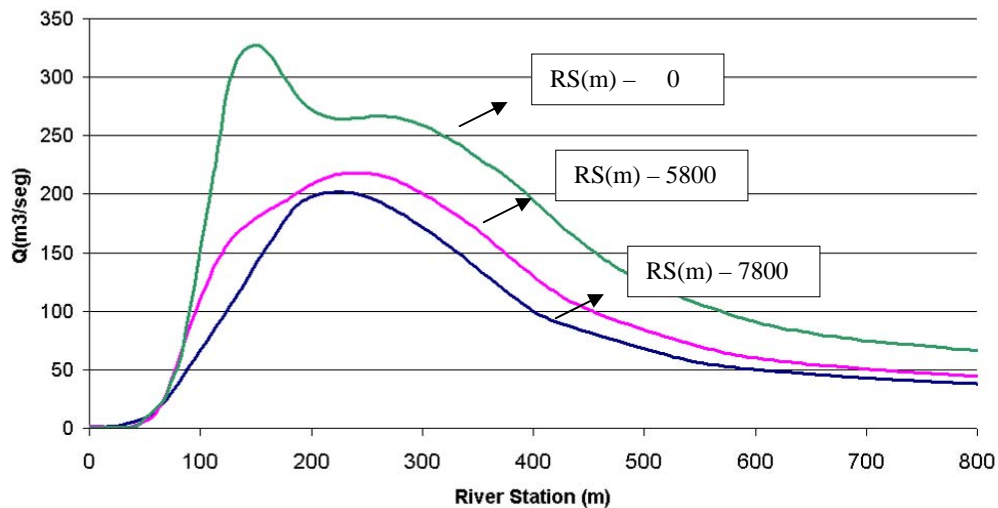


Figura 6.- Hidrogramas para distintas progresivas.

Este punto debe ser tenido en cuenta a la hora de definir futuros fraccionamientos o cambios de clasificación de suelo rural a urbano ya que la impermeabilización y canalización de lo que hoy es rural podría no solo aumentar su pico, sino también su velocidad, haciéndolo superponer con el de el resto de las cuencas. Esto aumentaría significativamente los caudales máximos actuales y por tanto los desbordes del arroyo.

## **Etapas 2: Modelo como herramienta de gestión**

Una vez construido el modelo queda disponible para su utilización como herramienta de gestión. En el año siguiente a culminada la Etapa 1 el modelo ha permitido dar respuesta a varias consultas que de otro modo no hubiesen podido responderse satisfactoriamente. Dentro de estas consultas específicas se destacan el estudio del impacto de rellenos de la planicie por parte de un privado, de la colocación de un sifón de cruce de saneamiento, evaluación de efecto de presas sobre inundaciones de viviendas y delimitación de zonas a realojar de asentamiento irregular en un tramo de un kilómetro. Este último caso es presentado a continuación.

**Caso de estudio: aplicación del modelo para la delimitación de zonas a realojar.-** En la cuenca media del arroyo, sobre el cauce del mismo se encuentra el asentamiento Paso las Duranas. Dada la situación de vulnerabilidad de la población, la exposición a inundaciones y los objetivos de recuperación del espacio público planteados en el Plan el realojo de estos se ha transformado en prioritario.

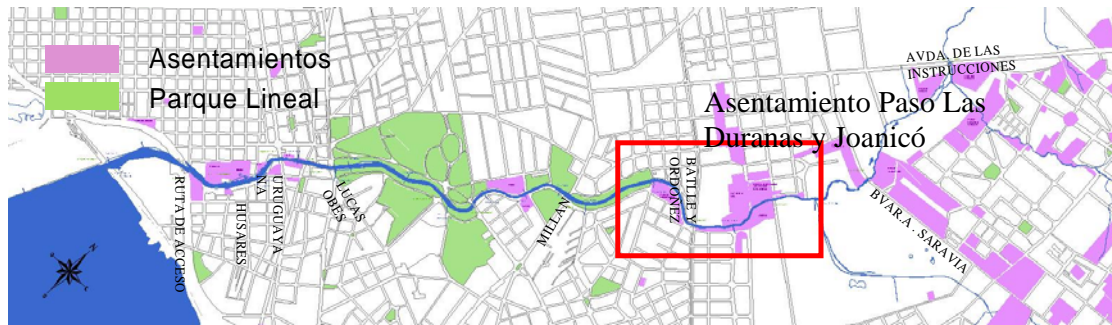


Figura 7.- Ubicación de asentamiento Paso las Duranas y Joanico.

Como antecedentes se contaba con curvas de inundaciones registradas antes de 1942, sin embargo al revisar las fotos aéreas se ha encontrado que el Arroyo en este tramo se ha modificado considerablemente. Se han instalado nuevos puentes, se ha impermeabilizado parte de la cuenca, e incluso se ha modificado parte de su traza.

El objetivo del estudio es entonces determinar alturas de inundación por período de retorno. Las familias más expuestas serán realojadas y sus viviendas demolidas. Los terrenos así recuperados pueden ser utilizados para parque o rellenados hasta llegar a alturas seguras y utilizados para construir viviendas nuevas.

Para esto se debe lograr una precisión de medio metro, por lo que se hacen nuevos relevamientos de secciones del arroyo (una cada 30 metros aproximadamente). Para tener datos contra los que comparar y validar el modelo se realizan encuestas a vecinos preguntando hasta donde y con qué frecuencia se inundan. Estos datos han tenido que ser analizados y filtrados, ya que varios eran inconsistentes con los datos proporcionados por otros vecinos.

Con estos datos vuelve a correrse y a validarse el modelo en esta zona, obteniendo la altura de período de retorno 100 años para esta zona.

Esta altura ha servido como plataforma para discutir las acciones a emprender con las oficinas encargadas de los realojos, de la cartera de tierras para vivienda nueva y con las oficinas encargadas de la ordenación del territorio. De estas oficinas surge la inquietud de rellenar e instalar viviendas nuevas en parte de los terrenos linderos al Arroyo. Se evalúa mediante el modelo el efecto de una posible reducción del cauce, sugiriendo una sección mínima de pasaje que debe quedar libre para no remansar el flujo del arroyo.

**Costos asociados a la modelación.-** Otro aspecto de gestión a tener en cuenta, en especial para instituciones con recursos humanos y económicos limitados, es la dedicación que este tipo de trabajos tiene. La dedicación de recursos humanos (y por tanto los costos finales asociados al proyecto) son los de la modelación propiamente dichas y los del relevamiento de los datos de base. Cuanto mayor sea el grado de precisión requerido mayor será también el tiempo a dedicar. En este sentido la metodología aplicada pretende concentrar una mayor dedicación de tiempo y recursos humanos a las zonas de interés.

La dedicación a este proyecto resultó en primera etapa fue de: cuatro meses de un ingeniero con experiencia en utilización de GIS y software de modelación, dos semanas de dibujante y tres jornadas de equipo de relevamiento compuesto por un Ing. Agrimensor, dos técnicos ayudantes y un peón. El costo total de esta etapa fue de aproximadamente US\$ 9.000.-

Para la segunda etapa se dedicaron dos semanas de trabajo de modelación, una semana de entrevistas a vecinos con un equipo formado por un ingeniero y dos ayudantes y tres jornadas de trabajo de equipo de relevamiento con un costo total de aproximadamente US\$ 2.500.-

Para valorar si esta inversión ha sido adecuada se comparan estos costos con los ahorros o beneficios económicos que la modelación puede tener. Previamente a la realización del modelo las decisiones se tomaban en base a herramientas menos precisas, por lo que ante estos enormes niveles de incertidumbre los técnicos aplicaban factores de seguridad más altos. Estos ajustes de los proyectos están asociados básicamente a los realojos a realizar, a la clasificación del suelo (y por tanto a lo que está permitido o no hacer sobre él) y a los movimientos de suelo para perfilar el arroyo o para la realización de rellenos. Si bien es difícil estimar cuánto es el ahorro o beneficio en cada caso, si se comparan los costos unitarios de ellos puede verse la conveniencia de la realización del modelo.

Tabla 1. Costos unitarios de proyectos afectados por crecidas del Arroyo.

Rubro	Unidad	Unitario(US\$)
Realojo	Familia	30.000
Movimiento de suelo	m <sup>3</sup>	5
Valorización de tierra	m <sup>2</sup>	50

Con estos costos unitarios se ve que todo el costo de la modelación se paga con el beneficio obtenido de una reducción en los movimientos de suelo de 2300 m<sup>3</sup>, con una reclasificación de suelo de 250m<sup>2</sup> o con evitar el realojo de una sola familia.

## CONCLUSIONES Y DESAFÍOS FUTUROS

La aplicación de este caso ha demostrado la utilidad de la modelación como herramienta para la planificación y gestión del territorio y sus ventajas en comparación con la utilización exclusiva de datos históricos. Se ha demostrado también la posibilidad de realizarlo con el personal y herramientas disponibles por una oficina ajena al ambiente académico y con recursos humanos limitados.

También se ha encontrado que los mapas de amenaza son una buena plataforma para establecer diálogo con otras áreas municipales con diferentes competencias y experticia. En este sentido ni el modelo ni el mapa de amenaza son un fin en sí mismo sino un insumo para la discusión con profesionales de otras áreas.

En vista de los resultados obtenidos se espera reproducir la metodología utilizada en los otros Arroyos principales de la ciudad que cuentan con problemas similares a los del Miguelete y en donde la ciudad formal y la informal tratan de expandirse.

También se han visto las dificultades de abordar estos problemas de forma integral con una estructura tradicional de organización, en donde cada oficina se ocupa de temas específicos de su área y de su profesión. El desafío en este sentido se centra, no solo la aplicación correcta de una técnica conocida y propia de ingeniería, sino en conocer las necesidades y limitaciones de otras disciplinas (y de la propia) y establecer los canales de comunicación que permitan un trabajo coordinado para una gestión efectiva de los cursos de agua.

## REFERENCIAS BIBLIOGRAFICAS

- USACE (2008). HEC-RAS User's Manual. Versión 4.0. CDP-68. US Army Corps of Engineers. Hydrologic Engineering Center.
- IM (2004). Plan Especial Arroyo Miguelete. Intendencia de Montevideo. Montevideo 94p, 2004.
- DINAGUA (2008). Informe Síntesis. Equipo Consultor en Inundaciones y Drenaje Urbano. Proyecto de Modernización de los Servicios Públicos del Banco Mundial. Montevideo, 2008.