

## **CONTROL DE INUNDACIONES EN LA CIUDAD DE SAN CARLOS, URUGUAY**

**Christian Chreties, Rodrigo Alonso, Guillermo López y Luis Teixeira.**

Instituto de Mecánica de los Fluidos e Ingeniería Ambiental, Facultad de Ingeniería, Universidad de la República, Uruguay  
Julio Herrera y Reissig 565, Montevideo, Uruguay. CP 11300

E-mail: [chreties@fing.edu.uy](mailto:chreties@fing.edu.uy), [ralonso@fing.edu.uy](mailto:ralonso@fing.edu.uy), [glopez@fing.edu.uy](mailto:glopez@fing.edu.uy), [luitei@fing.edu.uy](mailto:luitei@fing.edu.uy)

### **RESUMEN**

En este artículo se presenta la metodología y los resultados obtenidos en el estudio de la problemática de inundaciones de la ciudad de San Carlos. Esta ciudad, de 25000 hab., se encuentra bordeada por los arroyos Maldonado y San Carlos al Oeste y al Este respectivamente. Estos arroyos confluyen inmediatamente aguas abajo de la misma, conformando un humedal salino que se extiende hasta la desembocadura del arroyo Maldonado en el Océano Atlántico. Esta marisma es un ecosistema de elevada importancia para su conservación ya que por su extensión y características de biodiversidad resulta único en la región. En base a esto, se analizó la problemática de las inundaciones en la ciudad de San Carlos trabajando integradamente desde el punto de vista de la ingeniería fluvial y desde el punto de vista eco-sistémico-ambiental. En este sentido, fueron analizadas diferentes medidas estructurales y no estructurales considerando no solamente la reducción del área inundable atribuible a cada medida, sino también incorporando el impacto sobre el humedal salino del arroyo Maldonado. El estudio presentado en este trabajo brindó a las autoridades municipales y a los habitantes de la ciudad elementos técnicos para la resolución de las acciones concretas a llevar adelante.

### **ABSTRACT**

In this paper, the methodology and results of the San Carlos's floods case study are presented. This city has 25000 inhabitants and is limited eastern by the Maldonado creek and western by the San Carlos creek. These creeks converge immediately downstream of San Carlos city, flowing into a salt marsh that extends to the mouth of the creek in the Atlantic Ocean. This salt marsh has great importance for the conservation of the ecosystem, due their size and biodiversity features. San Carlos's floods problem has been analyzed integrating the fluvial hydraulics point of view with the environmental and ecosystem points of view. Some structural and non-structural flood control measures have been analyzed, taking into account the flooded area reduction and the impact over the salt marsh. This study provided municipal authorities and city residents with a technical tool to decide concrete actions.

## INTRODUCCIÓN

En este artículo se presenta la metodología y los resultados obtenidos en el estudio de la problemática de inundaciones de la ciudad de San Carlos. Esta ciudad, de 25.000 habitantes, se encuentra en la región Este de Uruguay, 20 km. al norte de Punta del Este. Los arroyos Maldonado y San Carlos bordean la ciudad, al Oeste y al Este respectivamente, y confluyen inmediatamente aguas abajo de la misma. (Figura 1). Diversos episodios de inundación debidos a crecidas de estos arroyos afectaron y preocuparon a los habitantes de San Carlos, quienes aprovecharon las distintas instancias de participación ciudadana para plantear la problemática y proponer soluciones. En este contexto, las autoridades de la Intendencia Municipal de Maldonado solicitan al IMFIA la realización de un estudio para abordar la problemática de las inundaciones en San Carlos y la gestión sustentable del arroyo Maldonado y su planicie de inundación. El estudio presentado en este trabajo brindó a las autoridades municipales y a los habitantes de la ciudad elementos técnicos para la resolución de las acciones concretas a llevar adelante.



Figura 1.- Ubicación de San Carlos (Izq.)- Marisma del A° Maldonado (Der.)

En los últimos 35 años ocurrieron muchos episodios de crecidas donde un importante conjunto de familias tuvieron que ser evacuadas. Particularmente se destacan tres episodios: Julio 1973, Mayo 2000 y Mayo 2005 donde en cada uno de ellos fueron evacuadas del orden de 130 familias.

Resulta importante destacar que aguas abajo de la ciudad de San Carlos se desarrolla un humedal salino (marisma) asociado al arroyo Maldonado. Esta marisma se extiende desde la confluencia de los arroyos San Carlos y Maldonado hasta la desembocadura en el Océano Atlántico (Figura 1). El humedal salino depende del aporte de agua dulce proveniente de los arroyos así como del ingreso de agua salobre oceánica. Modificaciones significativas de la

dinámica hídrica de este ecosistema provocan consecuencias negativas para la conservación de este ambiente. Las marismas del A° Maldonado y en segundo lugar de la Laguna de José Ignacio constituyen los únicos ambientes de este tipo desde la Lagoa dos Patos en Río Grande do Sul hasta el Sur de la Provincia de Buenos Aires en Argentina. Esto tiene implicancias determinantes para la distribución y sobrevivencia de las especies que dependen de estos ambientes. Por este motivo resulta clave considerar en la evaluación de medidas de mitigación de las inundaciones de San Carlos, como éstas afectan el régimen hídrico del humedal. Para ello, se trabajó de manera interdisciplinaria con un equipo de biólogos expertos en la caracterización y funcionamiento de estos ecosistemas. Este estudio fue presentado a los habitantes de la ciudad de San Carlos con el objetivo de que integren a la problemática de inundaciones la importancia de conservar uno de los ambientes de mayor riqueza ecológica del país.

## **OBJETIVOS**

Caracterizar en base a un modelo hidrodinámico las inundaciones fluviales de la ciudad de San Carlos. Evaluar distintas medidas estructurales y no-estructurales, considerando la efectividad, costo e impacto ambiental de cada una.

## **METODOLOGÍA**

El problema fue abordado en base a la modelación hidrodinámica uni-dimensional no estacionaria del sistema fluvial. El modelo fue calibrado y validado con la información histórica de niveles y caudales en los cursos y a partir del mismo se caracterizó la problemática y se evaluaron distintas medidas estructurales y no estructurales para el control de inundaciones. La caracterización de la problemática consistió en la determinación de las curvas de inundación para distintas recurrencias, mientras que las medidas evaluadas fueron: dragado y limpieza del cauce principal de ambos cursos, construcción de diques longitudinales de defensa, construcción de una o dos represas laminadoras aguas arriba de la ciudad, y medidas no estructurales de ordenamiento territorial. Para cada medida se evaluó su efectividad para controlar las inundaciones, se estimó su costo y se evaluaron sus consecuencias ambientales, especialmente sobre la marisma.

La modelación se realizó en base al software Hec-Ras 4.0 en el cual se esquematizó el sistema fluvial tal como se presenta en la Figura 2. En ella se indica la ubicación de las estaciones hidrométricas a partir de las cuales se obtuvo información de caudales y niveles. Como condición de borde aguas arriba se fijaron los niveles de agua en el arroyo Maldonado y San Carlos a la altura de los respectivos puentes de la Ruta Nacional N° 9. Como condición de borde aguas abajo se adoptó el nivel del Océano Atlántico (Mareógrafo ubicado en Punta del Este).

En las etapas de calibración y validación se ajustaron los coeficientes de rugosidad de Manning, de forma de lograr el mejor ajuste entre los resultados del modelo con: a) las curvas de aforo en las secciones transversales de los puentes de la Ruta 9, b) las curvas de inundación relevadas en la ciudad de San Carlos (1973, 2000, 2005) y c) los niveles registrados en la estación hidrométrica del puente existente aguas arriba de la desembocadura (Barra de Maldonado).

El modelo calibrado y validado fue utilizado para analizar los cambios hidrodinámicos en el sistema fluvial debido a la implementación de las distintas medidas de tipo estructurales planteadas.

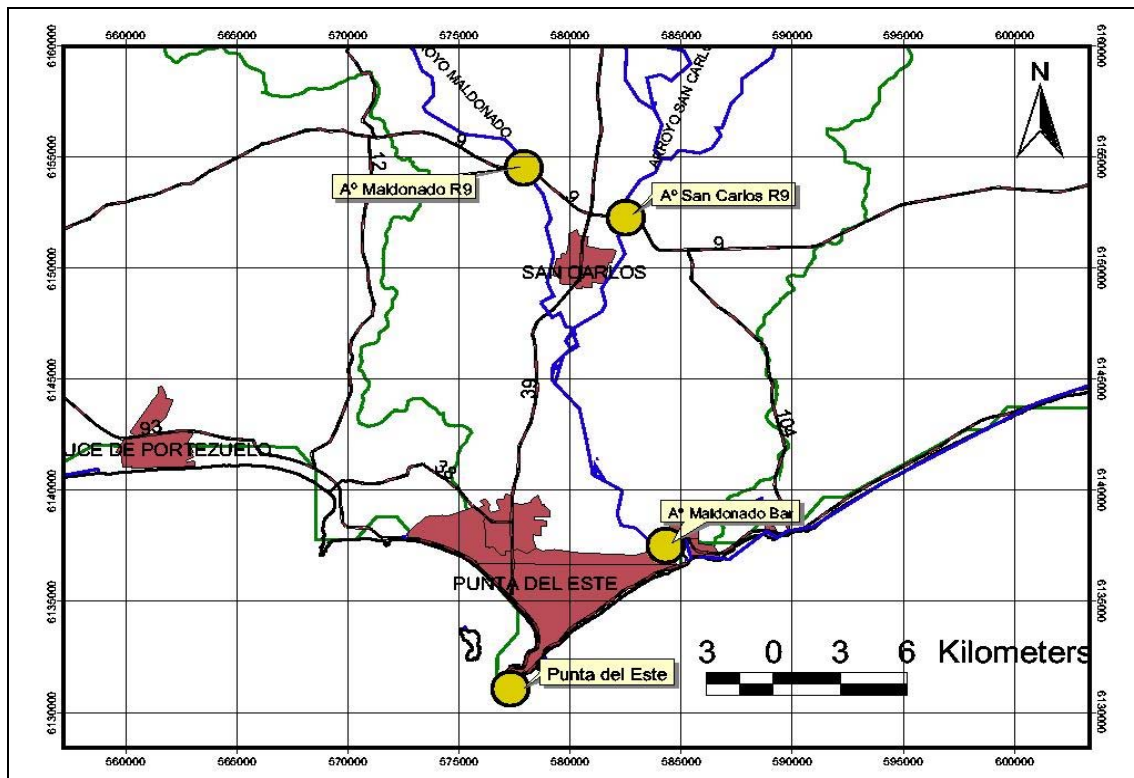


Figura 2.- Esquema del sistema fluvial modelado.

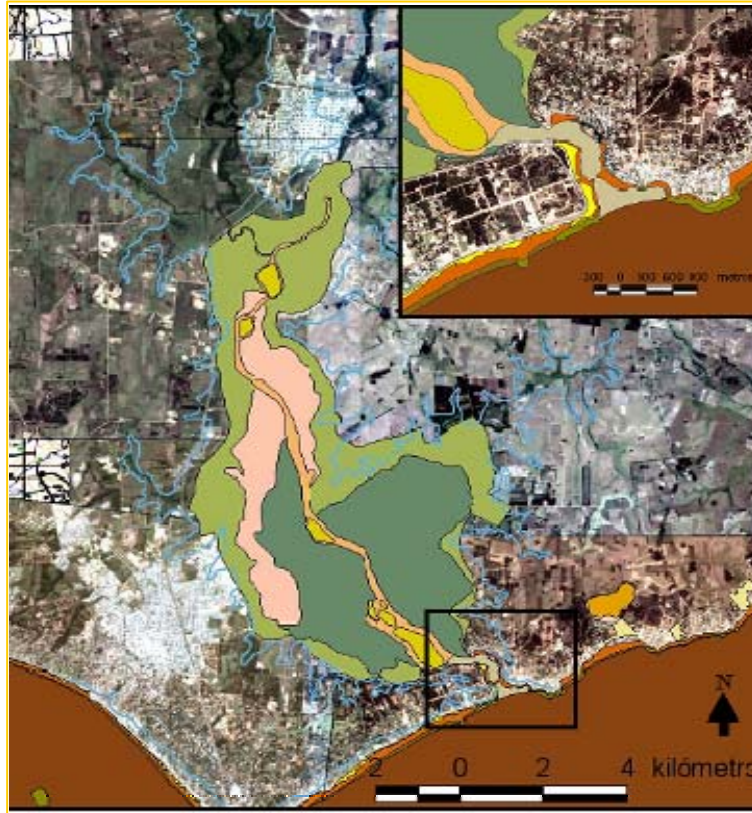
Desde el punto de vista ambiental, se realizó una caracterización de la marisma del arroyo Maldonado. Para ello, se clasificó el ecosistema en seis “Ambientes”. Dicha clasificación se realizó siguiendo criterios topográficos, geomorfológicos, ecológicos y botánicos establecidos en Fagúndez & Lezama (2005), utilizando imágenes satelitales Landsat y Google Earth Pro y mapas topográficos de la zona. En segundo término fueron definidos siete criterios de biodiversidad: 1) especies endémicas o raras y/o con distribución restringida; 2) especies en riesgo de extinción; 3) especies migratorias; 4) especies prioritarias para el Sistema Nacional de Áreas Protegidas (SNAP); 5) especies carismáticas; 6) especies involucradas en procesos eco-sistémicos y 7) especies con otros valores.

Mediante la recopilación y revisión de colecciones, publicaciones y consulta a especialistas locales, fueron identificadas, en cada “Ambiente” de la marisma, aquellas especies (mamíferos, aves, reptiles, anfibios, peces, invertebrados terrestres y acuáticos y plantas superiores) que cumplen con alguno de los siete criterios de biodiversidad establecidos. En base a esta información, se elaboró un Sistema de Información Geográfico que permitió establecer la distribución espacial de los valores de biodiversidad de interés para su conservación que tiene cada “Ambiente”. En base a esto, se determinaron aquellas zonas del humedal donde no sería admisible un cambio en el régimen hídrico actual, aquellas zonas donde es posible un cambio hidrológico acotado y aquellas zonas donde podrían ser admisibles cambios significativos en el régimen hídrico. Este análisis en conjunto con los resultados del modelo hidrodinámico en cuanto a los cambios en el régimen hídrico que

provoca cada alternativa de control de inundaciones, permitió evaluar el impacto ambiental de cada alternativa.

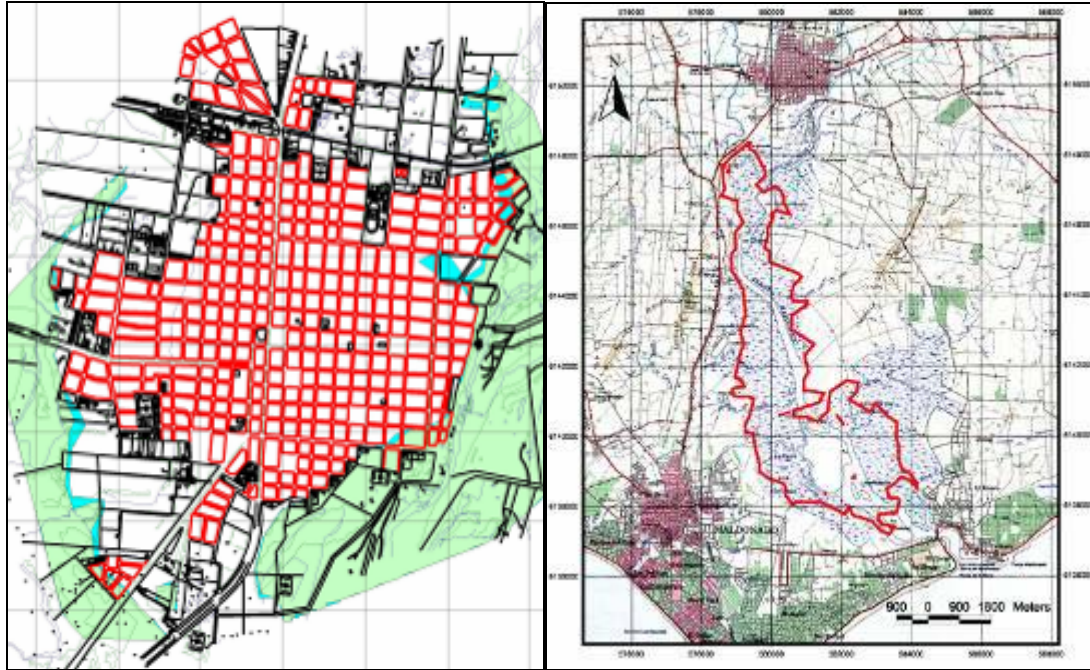
## RESULTADOS

Desde el punto de vista ambiental, se establecieron 6 “Ambientes” (Figura 3) en la zona del humedal de los cuales los de mayor interés para su conservación son; “Marisma o humedal salino” (verde oscuro), “Pastizal Costero” (salmón) y en segundo término “Planicie de Inundación” (verde claro). Específicamente, los ambientes “Marisma” y “Pastizal Costero” no toleran cambios en el régimen hídrico ni en la salinidad del ecosistema.



**Figura 3.-** Identificación de “Ambientes” en la zona de estudio. En verde oscuro el ambiente “marisma”, en salmón el ambiente “pastizal costero” y en verde claro el ambiente “planicie de inundación”. En la zona de la desembocadura aparecen otros ambientes.

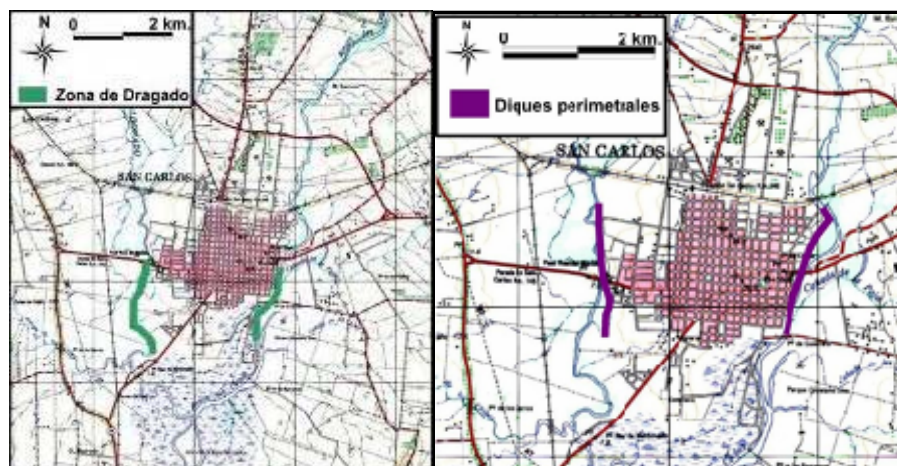
En cuanto a la caracterización de las inundaciones en la ciudad de San Carlos, en la Figura 3 (izquierda) se presentan los resultados obtenidos al simular eventos de 10 (verde claro) y 100 años (celeste) de recurrencia. Para el caso de los eventos de 10 años de recurrencia, se tiene una zona inundable que provoca la evacuación de 112 familias, mientras que para eventos de 100 años de recurrencia la zona inundable provoca la evacuación de 150 familias. Este resultado marca la escala o magnitud de la problemática de las inundaciones en la ciudad de San Carlos. En consecuencia, se trata de una extensión de zona inundable suficientemente acotada, lo que llevó a incluir las estrategias de ordenamiento territorial, dentro de las posibles alternativas de solución.



**Figura 3.-** Izquierda: Zona inundada para eventos de 10 años (verde) y 100 años (celeste) de recurrencia. Derecha: Impacto de la construcción de represas de laminación para régimen medio.

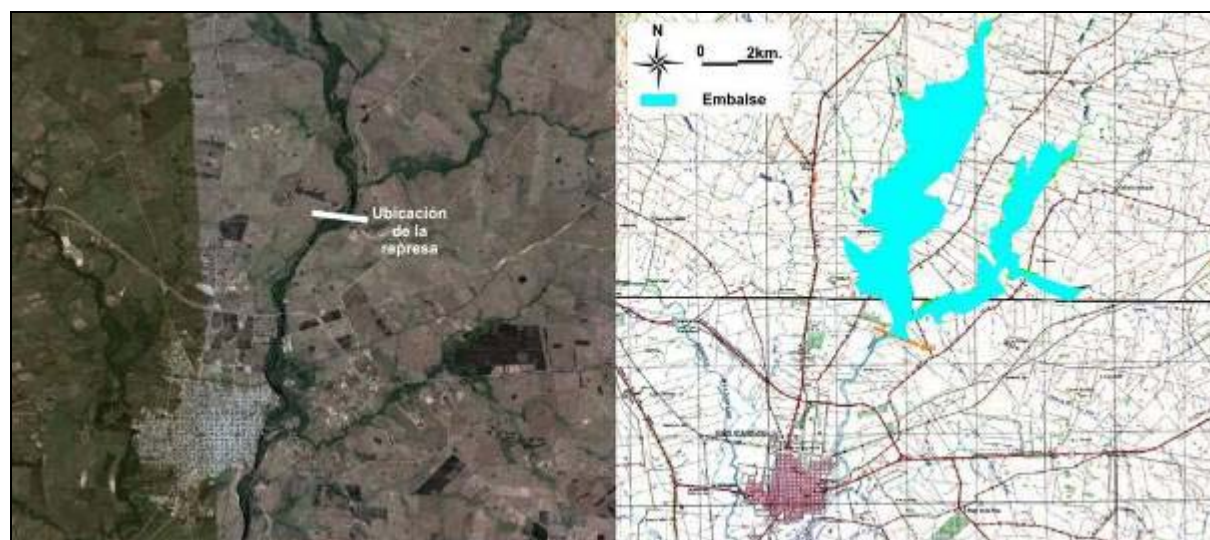
Las alternativas de control de inundaciones estudiadas fueron las siguientes: 1) Dragado y limpieza de los cauces, 2) Construcción de diques laterales de defensa, 3) Construcción de represas de laminación, 4) Estrategias de ordenamiento territorial. En el caso de las represas de laminación, se estudiaron 3 alternativas: una represa en el arroyo Maldonado, una represa en el arroyo San Carlos y dos represas una en cada arroyo.

En la Figura 4 se presenta la ubicación de la zona de dragado y limpieza de cauces y la zona de emplazamiento de los diques perimetrales (laterales) de defensa. En la Figura 5, se presenta la ubicación de las represas de laminación analizadas.



**Figura 4.-** Izquierda: Zona de dragado y limpieza de cauces (alternativa 1). Derecha: Ubicación de los diques perimetrales de defensa (alternativa 2).

Para todos los casos (a excepción de la alternativa 4) se analizó la efectividad en el control de la crecida y el impacto en el régimen hídrico del humedal a partir del modelo hidrodinámico del sistema fluvial.

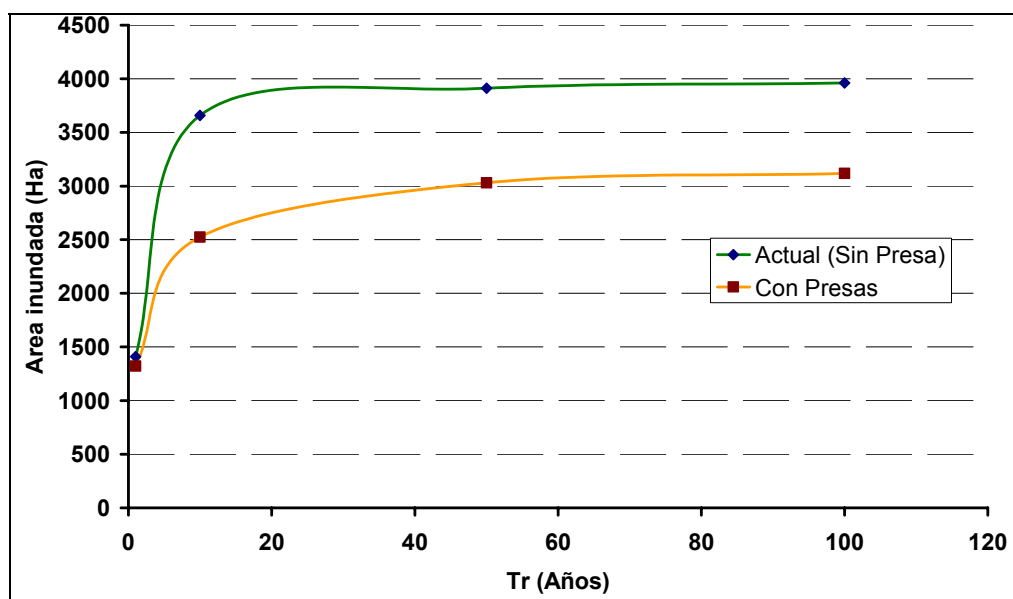


**Figura 5.-** Ubicación de las represas de laminación de crecidas analizadas.

En la Tabla 1 se presentan los resultados obtenidos en la evaluación de cada medida en cuanto a su efectividad de mitigación de crecidas, aspectos económicos y ambientales, para el evento extremo de mayo de 2000 (aprox. 100 años de recurrencia). El dragado de los cauces resulta inefectivo, especialmente debido a que se trata de cursos aluviales de llanura donde la mayor parte del caudal en crecida circula por la planicie de inundación. Si bien este resultado es conocido en términos generales, resultó necesario desarrollarlo para este caso, de modo de concienciar a los pobladores. La construcción de diques laterales resulta una medida eficiente pero requiere la solución del problema de drenaje interno de las aguas pluviales. Además, esta medida conlleva a una “falsa seguridad”, ya que para crecidas cuyo nivel superen el coronamiento del dique, la situación resulta peor que la actual. Tanto en el caso del dragado de cauces como en el caso de la construcción de diques laterales de defensa, el impacto en el régimen hídrico hacia aguas abajo de estas medidas resultó poco significativo. Por tanto, desde el punto de vista ambiental, la afectación es esencialmente en la localización de ambas medidas (afectación local de bajo impacto).

Finalmente, la medida estructural más efectiva para el control de avenidas resulta la construcción de 2 represas de laminación. Esta solución no solo es por lejos la más costosa, sino que además provoca un fuerte impacto ambiental en el humedal. Este impacto fue cuantificado a partir de la afectación de la dinámica hídrica del humedal, tanto en relación a los caudales extremos como a los caudales medios y bajos.

En el caso de caudales extremos fue cuantificada la disminución del área inundada de humedal para diferentes recurrencias, encontrando que para eventos con recurrencia superior a 10 años, el área inundada disminuye en al menos un 33% respecto a la situación actual.



**Figura 6.-** Impacto sobre los caudales extremos del humedal de la construcción de 2 represas de control de inundaciones aguas arriba de la ciudad de San Carlos.

Por su parte, se analizó el impacto sobre la curva de permanencia de niveles y caudales en el humedal como consecuencia de la construcción de las represas. En este sentido, se encontró que existirá un aumento de permanencia en niveles y caudales bajos y medios que llegan al humedal y una disminución de la permanencia de niveles y caudales altos, existiendo un punto crítico donde las represas no provocan afectación en relación a la situación actual. Este punto crítico en términos de área del humedal se presenta en la Figura 3 – derecha: curva roja.

De ambos análisis resulta que la zona del humedal periférica (exterior de curva roja en la Figura 3 derecha) recibe menos cantidad de agua dulce, secándose el humedal en la zona alta y salinizándose la zona baja. Por su parte, la zona interna del humedal (interior de la curva roja en la Figura 3 derecha) recibe más agua dulce y por lo tanto sufrirá desalinización. Esta situación no resulta admisible desde el punto de vista ambiental, ya que las especies hoy existentes en el humedal no tolerarían esta variación del régimen hídrico y salino.

**Tabla 1.-** Evaluación de las alternativas para el evento de Mayo 2000. Se incluye solo el costo de movimiento de suelo.

Alternativa	Manzanas afectadas	Afectación ambiental	Costo estimado (US\$)
Situación Actual	59	-	-
Dragado	59	Baja-Local	2:625.000
Diques de defensa	16	Baja-Local	2:475.000
Represa A° Maldonado	36	Alta-General	7:900.000
Represa A° San Carlos	49	Alta-General	9:800.000
Represas ambos arroyos	8	Alta-General	17:700.000



## CONCLUSIONES

En base a un modelo hidrodinámico del sistema fluvial conformado por los arroyos Maldonado y San Carlos se caracterizaron las inundaciones fluviales de la ciudad de San Carlos y se evaluaron distintas medidas para el control de las crecidas. Esta evaluación se realizó considerando no solamente la reducción del área inundable atribuible a cada medida, sino también incorporando el impacto sobre el humedal salino del arroyo Maldonado.

El impacto ambiental en el humedal del arroyo Maldonado se realizó incorporando la caracterización eco-sistémica realizada, que permitió establecer las zonas de mayor vulnerabilidad y las zonas de mayor interés para la conservación de la biodiversidad.

De todas las medidas estructurales evaluadas, la única que generaría reducciones significativas en el área inundable de la ciudad de San Carlos, es la construcción de 2 represas de laminación. Para esta medida, los impactos en el régimen hídrico del humedal son muy importantes, generando situaciones irreversibles para ese ecosistema.

Se recomendó entonces la aplicación de medidas de ordenamiento territorial que permitan realojar a las familias que ocupan la planicie de inundación. Esta medida es económicamente viable debido a que el número de inundados es suficientemente bajo y a su vez es la única medida efectiva que no afecta el régimen hídrico del humedal. Para su implementación, que ya ha sido iniciada exitosamente, ha sido necesario resolver conflictos sociales vinculados al desarraigo e implementar políticas de concientización social tendientes a evitar la re-ocupación futura de la planicie de inundación.

*Agradecimientos.* Los autores agradecen a la Dirección Nacional de Hidrografía del Ministerio de Transporte y Obras Públicas por la información hidrométrica brindada para el estudio.

## REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

**Capeluto, A.** (2004). "Seguridad de obras de control de inundaciones fluviales". Tesis de Maestría en Ingeniería Ambiental, Facultad de Ingeniería, Universidad de la República, Uruguay.

**Fagundez, C., Lezama, F** (2005). "Distribución Espacial de la Vegetación Costera del Litoral Platense y Atlántico Uruguayo" Final Report, Ecoplata.

**Gimenez, L.** (2003). "Potential effects of physiological plastic responses to salinity on population networks of the estuarine crab *Chasmagnathus granulata*" *Helgol Mar Res* 56:265-273.

**IMFIA** (2008). "Estudios del arroyo Maldonado orientado a definir la política de manejo integrado de su curso y planicie de inundación", Convenio: Intendencia Municipal de Maldonado-UdelaR IMFIA, Informe Final.

**Isacch J.P et al** (2006). "Association between distribution pattern of vascular plants and environmental factors in SW Atlantic saltmarshes" *Journal of Biogeography* 33:888-900.