

**XXIX CONGRESO LATINOAMERICANO DE HIDRÁULICA
MÉXICO, 15 AL 19 DE NOVIEMBRE DE 2021
EVENTO VIRTUAL**

**MODELACIÓN NUMÉRICA DE LA SALINIDAD EN EL ESTUARIO DEL
RÍO SANTA CRUZ**

Paula Consoli-Lizzi, Federico Zabaleta y Sergio Liscia

*UIDET Hidromecánica, Facultad de Ingeniería, Universidad Nacional de La Plata, Argentina
Calle 47 N° 200, La Plata (CP1900) - Tel: +54 (0221) 423-6684 Interno 172
paula.consoli@ing.unlp.edu.ar, soliscial@gmail.com*

RESUMEN:

En el diseño y construcción de dos presas sobre el río Santa Cruz (Argentina) se han contemplado aspectos ambientales para la toma de decisiones. Uno de estos aspectos es la elección de un hidrograma de llenado, para lo cual se ha desarrollado un modelo numérico del estuario del río Santa Cruz. El mismo se ha sustentado en la realización de mediciones en campo ad-hoc, destacando los monitoreos continuos y puntuales en sitios seleccionados. El modelo se implementó con la herramienta Delft3D (Deltares, Holanda), y tras su calibración ha demostrado reproducir la evolución espacio-temporal de la hidrodinámica y salinidad del estuario. Se han analizado escenarios correspondientes a situación actual y durante posibles hidrogramas de llenado, cuantificando la afectación a la salinidad. Se espera que estos resultados sirvan como herramienta a los tomadores de decisiones.

ABSTRACT:

Environmental aspects have been considered for decision-making in the design and construction of two dams on the Santa Cruz River (Argentina). One of these aspects is the choice of a filling hydrograph, for which a numerical model of the Santa Cruz River estuary has been developed. It has been based on ad-hoc field measurements, in particular the continuous and punctual monitoring at selected sites. The model was implemented using Delft3D (Deltares, Netherlands), and after its calibration it has shown to reproduce the spatio-temporal evolution of the hydrodynamics and salinity of the estuary. Scenarios corresponding to the current situation and during possible filling hydrographs have been analyzed, quantifying the effect on salinity. These results are expected to serve as a tool for decision makers.

PALABRAS CLAVES: modelo numérico; estuario; salinidad

INTRODUCCIÓN

La cuenca del río Santa Cruz constituye uno de los recursos hídricos más importantes de Argentina. Tal como se observa en Figura 1, el río nace en el lago Argentino, teniendo sus aguas origen en el campo de hielo continental, y recorre unos 385 km hacia el este hasta que desemboca en el océano Atlántico, en un estuario que comparte con el río Chico.

El estuario constituye un ecosistema único, cuyos parámetros físicos están gobernados por los aportes del río y por las mareas de gran amplitud existentes en esas latitudes. Constituye además el hábitat de invernada del Macá Tobiano, ave endémica en peligro.

Actualmente, aguas arriba del mismo se están construyendo dos presas, y se prevé que durante el llenado de las mismas se modificará el hidrograma del río, lo cual cambiará temporalmente los campos de velocidades, salinidad y temperaturas y el tiempo de residencia del estuario.

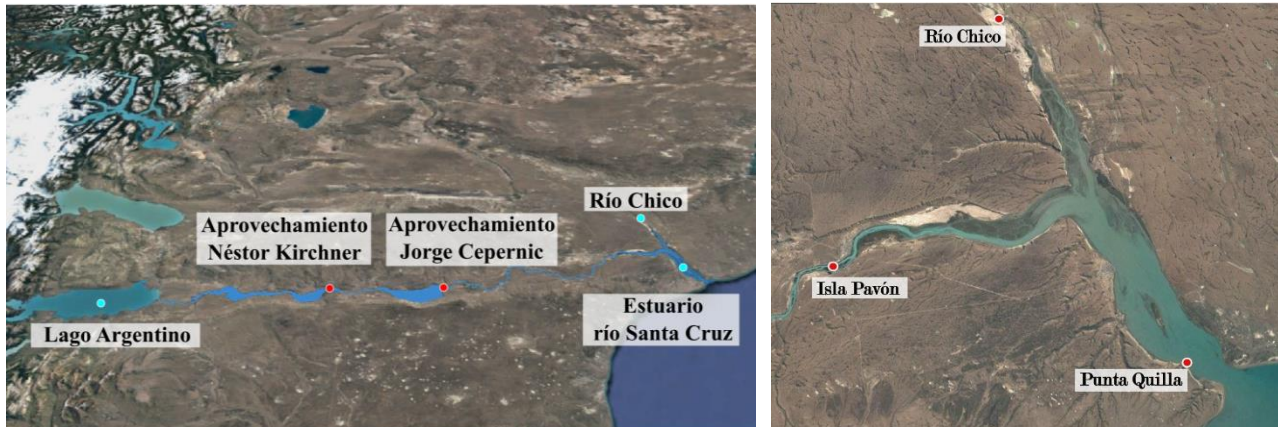


Figura 1.- Río Santa Cruz y su estuario. Izc.: Traza del río y sitios de interés. Dcha.: Detalle del estuario. Se indican tres sitios de monitoreo: Isla Pavón en río Santa Cruz, puente sobre río Chico y puerto de Punta Quilla.

OBJETIVOS DEL TRABAJO

Durante la construcción de nuevos aprovechamientos hidroeléctricos, es una práctica habitual la elección de consignas de erogación atendiendo a consideraciones asociadas a la generación energética, respetando requerimientos ambientales a través de la introducción de erogaciones mínimas de acuerdo con el denominado caudal ecológico de tramos del río. En el trabajo actual, se desarrolla una herramienta que brinda un criterio adicional, vinculado a la potencial afectación del hidrograma de llenado sobre el estuario.

Como primer objetivo se buscó describir la línea de base y entender el funcionamiento del sistema en su estado actual, sin presas. Como segundo objetivo se planteó la necesidad de caracterizar el comportamiento durante el llenado de los embalses. Al reducirse el caudal del río se incrementa el tiempo de residencia en el estuario y aumenta la salinidad del mismo, siendo este último el parámetro en que se enfocó el presente monitoreo debido a que es un importante condicionante del ambiente para la biota. Dado que durante la construcción y la operación de las obras el hidrograma no ha de modificarse respecto del observado en la cabecera del río, estos escenarios coincidirían con la situación sin obras.

En definitiva, el contraste de ambas configuraciones (situación actual y llenado) proporciona una herramienta para identificar un cronograma de llenado que minimice la afectación ambiental.

MATERIALES Y MÉTODOS

Atendiendo a las características del sistema, el software seleccionado para implementar el modelo del estuario es el Delft3D, software gratuito desarrollado por Deltares (Holanda). Su módulo hidrodinámico está basado en la simplificación de aguas poco profundas para las ecuaciones de Navier-Stokes, y permite incorporar los efectos de mareas, vientos, gradientes de salinidad y temperatura, olas, turbulencia y secado y mojado.

El desarrollo, calibración y validación de todo modelo numérico requiere de relevamientos y mediciones en campo. La información preexistente para el estuario consistía en topobatemetrías y series diarias de caudales del río, y los requerimientos para el desarrollo del modelo conllevaron la ejecución de nuevas campañas de caracterización. Entre ellas destacan las mediciones continuas de niveles, salinidad, temperatura y turbidez, así como muestreos mensuales de agua para determinación de sólidos suspendidos y nutrientes (Ezcurra & Schmidt S.A., 2018), en puntos representativos de la dinámica de los tres cuerpos de agua que se encuentran en el estuario (ver Figura 1). Adicionalmente, la instalación de una estación meteorológica permitirá a futuro profundizar el conocimiento y extender los alcances del modelo.

Implementación y calibración del modelo

Con la información disponible, se desarrolló en Delft3D un modelo bidimensional de los últimos 37 km del río y de su estuario. En la Figura 2 se aprecia la discretización empleando una malla estructurada, con dos sub-grillas de diferente nivel de refinamiento según se trate del tramo final del río o más próximo al mar, con celdas del orden de unos 5 m o 50 m de lado respectivamente (52128 y 20608 elementos). La calibración requirió especial atención en la discretización de la batimetría, y la adopción de rugosidades de Manning de 0.020 para el estuario y 0.025 para el río. Tal como muestra la Figura 2, se validó su capacidad de simular la hidráulica y el transporte de salinidad en base a mediciones de campo. Simultáneamente, los avances parciales en el mismo permitieron ajustar la planificación de las campañas de muestreo.

Resta explicitar las condiciones impuestas a los tres contornos abiertos del modelo: caudales ingresantes y salinidad 0 UPS para ríos Santa Cruz y Chico, y niveles y salinidad 32 UPS en el Mar. Asimismo, se menciona que las modelaciones tienen un período inicial (coincidente con la magnitud del tiempo de residencia) de estabilización de la salinidad para el cual no se consideran los resultados.

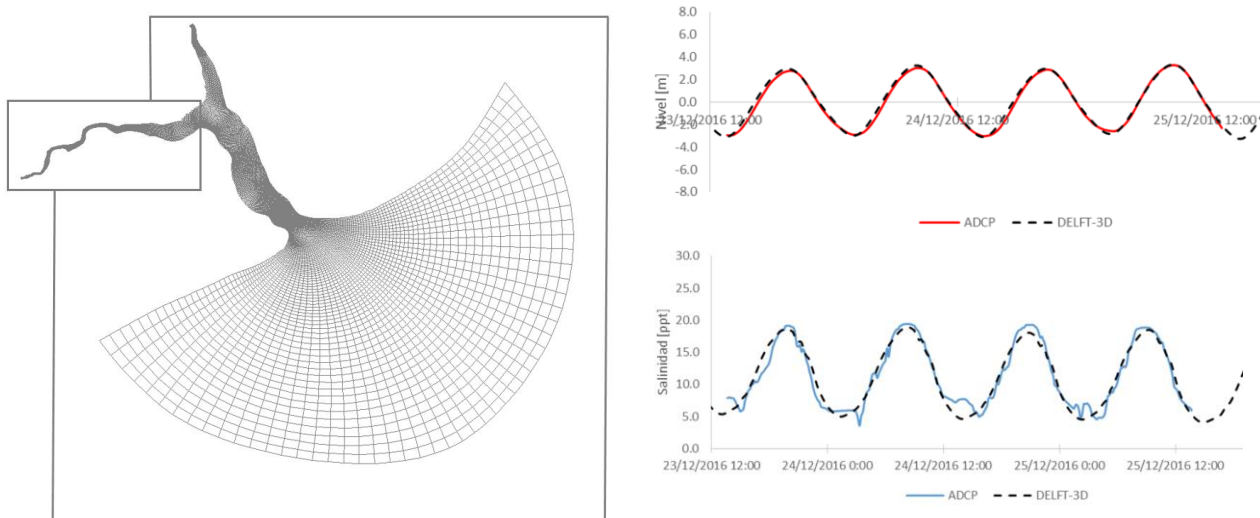


Figura 2.- Discretización y calibración del modelo. Izq.: Dominio abarcado por ambas sub-grillas. Dcha.: Contraste de resultados del modelo (línea discontinua) y mediciones con ADCP (línea continua) durante la calibración: niveles en una estación en el mar (arriba) y salinidad en una estación en el estuario (abajo).

Escenarios estudiados

El conocimiento preexistente de la dinámica del estuario era prácticamente inexistente, por lo cual el primer paso fue explotar el modelo para comprender su funcionamiento actual, inspirado en trabajos como los de Perillo (1995) y Edinger (1998). En este sentido, inicialmente se hicieron observaciones de velocidades en la boca del estuario y se generaron escenarios específicos para estudiar el tiempo de residencia (Garvine et al 1991, Wang et al. 2004, Dukhovskoy 2012), a liberando un trazador no reactivo y monitoreando la evolución de su concentración dentro del estuario al adoptar diferentes valores fijos del caudal del río Santa Cruz. Para los fines del presente trabajo, aquí reportamos únicamente el funcionamiento sin represas caracterizado a través del estudio de un año medio. El

mismo queda representado por la imposición del hidrograma medio del río Santa Cruz, entendido como el resultante de asignar los caudales mensuales superados el 50% del tiempo e interpolarlos, de acuerdo con las observaciones diarias a lo largo de más de 60 años en la estación hidrométrica Charles Fuhr. Si bien no se expone en detalle, el modelo también ha sido explotado para monitorear el efecto de hidrogramas de caudales mínimos, ya sea de un año seco o sintetizado contemplando cierto porcentaje de excedencia, que también constituyen una referencia a tener presente.

En cuanto a los hidrogramas de llenado, se han analizado una variedad de alternativas a medida que se ha avanzado en la concreción del proyecto, exigencias ambientales y caracterización del medio. Ellos se han propuesto a partir de la explotación del un modelo de operación de embalse que maximiza la producción energética, atendiendo a recomendaciones de erogaciones mínimas según un estudio de caudal ecológico de la Universidad de Valladolid para este proyecto, y respetando consignas tales como evitar o minimizar afectaciones durante la invernada del Macá Tobiano.

En la Figura 3 puede observarse un ejemplo de dos hidrogramas a contrastar. Un año medio, cuyo régimen hidrológico de origen glacial presenta máximos en marzo y mínimos en septiembre. Y un hidrograma de llenado optimizado, en que se erogan intermitentemente caudales ambientalmente significativos (Q_{100} , Q_{98} y Q_{95} , donde el subíndice indica excedencia histórica; así Q_{100} es el mínimo observado), a la par que se interrumpe el llenado en los meses de invernada del Macá Tobiano y en los hídricamente más pobres, a fin de mitigar impactos negativos. A esta propuesta optimizada se ha llegado luego de evaluar gran cantidad de escenarios de llenado y observar sus efectos.



Figura 3.- Hidrograma de un año medio (rojo) y último hidrograma propuesto para el llenado (verde). Las líneas de puntos constituyen, a modo de referencia, hidrogramas sintetizados en base a observaciones de cierto porcentaje de excedencia.

RESULTADOS

Las modelaciones de la situación de base permitieron cuantificar la fuerte dependencia temporal del sistema con las mareas y, en menor medida, con los caudales del río. De hecho, se comprobó que los caudales en la boca del estuario son varios órdenes de magnitud mayores que los aportados por el río Santa Cruz, y que por ende las variaciones semidiurnas son de gran magnitud, incluyendo desplazamientos de la intrusión salina de más de 10 km. Los resultados más relevantes consistieron en la generación de mapas espaciales y de series temporales que describen niveles, velocidades y salinidad, así como el cálculo del tiempo de residencia. Éste último se reduce cuando aumenta el caudal del río Santa Cruz, y es del orden de 15 días.

A modo de ejemplo, la Figura 4 presenta la distribución espacial de salinidad durante pleamar y bajamar de un mismo día de julio en un año medio, donde el azul corresponde a salinidad nula del río, y rojo a la salinidad del mar de 32 ppt. Es clara la variación semidiurna y avance del frente salino originado por las mareas.

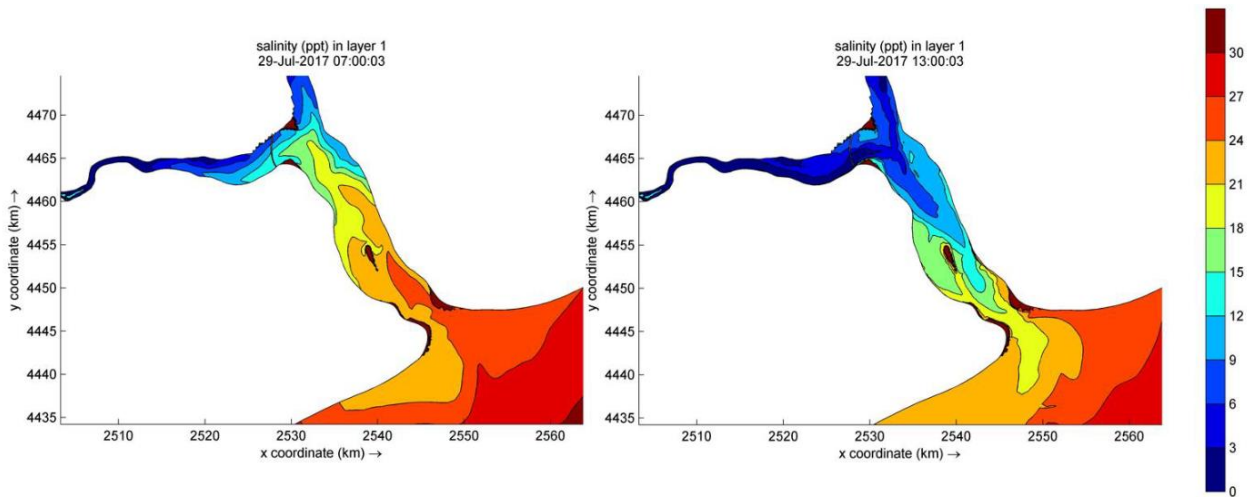


Figura 4.- Distribución de salinidad en un rango de 0 a 32 ppt, durante pleamar (izquierda) y bajamar (derecha) durante un día de invernada del Macá Tobiano.

Del hidrograma de llenado seleccionado, se reporta la modificación en la salinidad, contextualizándola dentro de las amplias variaciones semidiurnas que ocurren sin obras. En el caso de Figura 5 se representa la evolución temporal de la salinidad a lo largo del año en un punto fijo en el centro del estuario. La serie correspondiente al año medio presenta salinidad mínima en los meses hídricamente más ricos, y muestra una amplitud semidiurna considerable que ya se había anticipado en mapas como el de Figura 4. La salinidad correspondiente al hidrograma de llenado presenta patrones similares en el sentido de que exhibe variaciones semidiurnas, y máximos cuando disminuye el caudal del río. Pero al inicio de cada período de llenado la salinidad observada en pleamar se incrementa, y cuando se interrumpe le toma algo más de dos semanas (tiempo de residencia) regresar a los valores observados en un año medio. El máximo absoluto de salinidad se observaría a fin de agosto, sobrepasando al máximo absoluto del año medio que acontece en octubre. Este tipo de observaciones está disponible para varios puntos del dominio, resultando que aguas arriba la recuperación tras cada interrupción del llenado es más rápida.

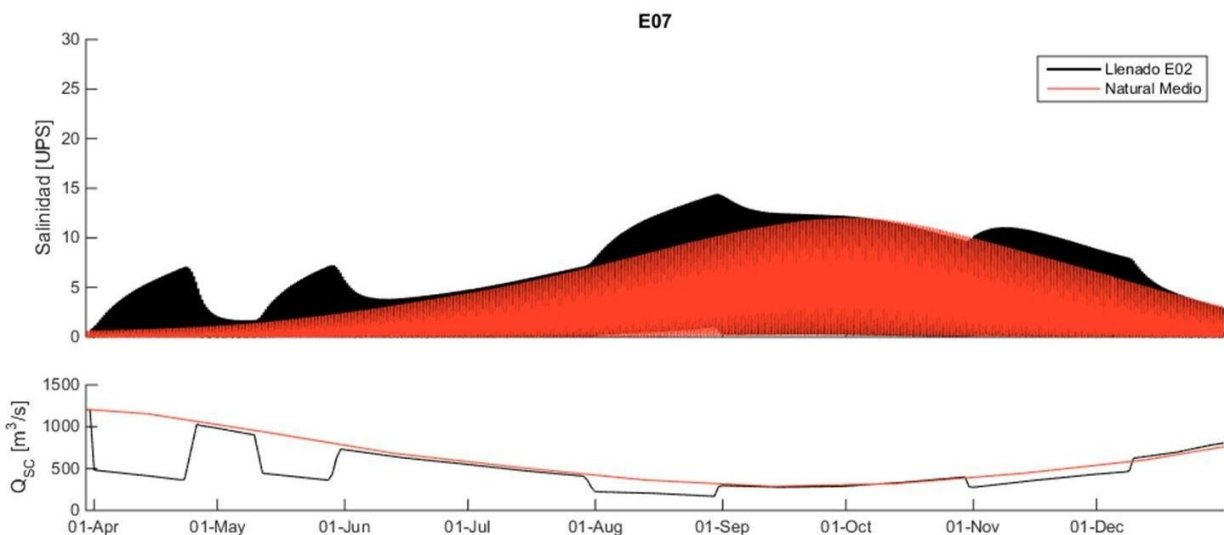


Figura 5.- Modelación de la evolución de la salinidad en un sitio fijo a lo largo de un año, en situación sin intervención (serie naranja) y durante un escenario de llenado (negro). En la parte superior se representa la evolución temporal de la salinidad propiamente dicha (obsérvese la variación semidiurna), mientras que el gráfico inferior presenta la evolución de caudales correspondientes a cada hidrograma ingresante desde río Santa Cruz para facilitar su interpretación.

Como productos específicos de mayor interés para selección de hidrograma de llenado, se documenta además la variación de salinidad en la zona de avistamientos del Macá Tobiano y la potencial afectación a la toma de agua de una localidad cercana. Concretamente, la Figura 6 izquierda se ha generado postprocesando con un código propio los mapas de salinidad de ambos escenarios para obtener la diferencia entre los valores medios de ambos para el mes de internada del Macá Tobiano. La gráfica de la derecha da cuenta de la reducción de la disponibilidad de agua dulce para abastecimiento de una localidad cercana debido al avance del frente salino, observándose el impacto más significativo en el mes de agosto.

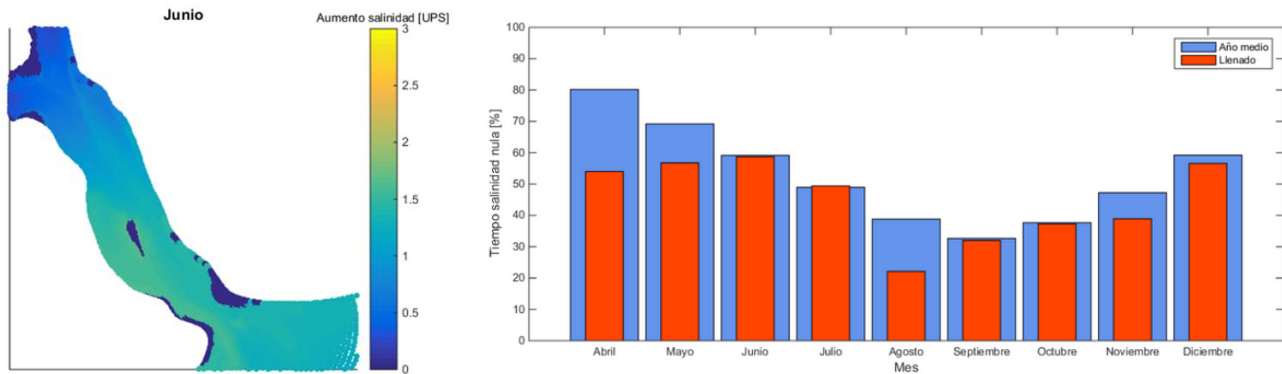


Figura 6.- Afectaciones específicas. Izq.: Aumento de la salinidad en el sector ocupado por el Macá Tobiano durante el llenado en el mes de Junio, respecto de un año medio. Dcha.: Tiempo de permanencia de salinidad nula en cercanías de toma de agua Puerto Santa Cruz

Se hace notar al lector que, si bien no se reportan, las modelaciones de escenarios alternativos han sido parte del proceso de optimización que llevaron a la propuesta del hidrograma de llenado aquí discutido. Por otra parte, se deja constancia de que la información generada no concluyente, sino que constituye una herramienta para que los tomadores de decisiones dictaminen si el esquema de llenado propuesto se ajusta a los requisitos ambientales.

CONCLUSIONES

Los resultados de las simulaciones numéricas proveyeron una cuantificación de afectaciones para cada escenario de llenado propuesto. Así, se dispuso de una herramienta para la selección de un hidrograma de llenado optimizado (el único cuyos resultados se han reportado en este trabajo), permitiendo una toma de decisiones contemplando no sólo la generación de energía, como es práctica habitual, sino también consideraciones ambientales.

A futuro, se prevé extender el modelo, incluyendo la capacidad de representar temperatura del agua y transporte de sedimentos.

BIBLIOGRAFÍA

- Deltares.** (2014). “Delft3D-Flow, User Manual v.3.15.34158.”
- Dukhovskoy, S. M.** (2012). “Analysis methods for characterizing salinity variability from multivariate time series applied to the Apalachicola Bay estuary”. *Journal of atmospheric and ocean technology*, 29, 613-628.
- Edinger J.E., B. E.** (1998). “Modelling flushing and mixing in a deep estuary”. *Water, Air, and Soil Pollution* 102, 345–353.
- Ezcurra & Schmidt S.A.** (2018). “Modelación hidrodinámica, dispersión y transporte de sedimentos. Estuario del Río Santa Cruz, Provincia de Santa Cruz”. Documentación de la obra *Aprovechamiento Hidroeléctrico del río Santa Cruz*.
- Garvine, R., McCarthy, R., & Wong, K.-C.** (1991). “The Axial Salinity Distribution in the Delaware Estuary and its Weak Response to River Discharge”. *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, Vol 35, Issue 2, 157-165.

- Inspección Universidad Nacional de La Plata** (2018). “Estudio, caracterización y evaluación del impacto de las represas Cóndor Cliff y La Barrancosa en el estuario del río Santa Cruz”. Documentación de la obra *Aprovechamiento Hidroeléctrico del río Santa Cruz*.
- Perillo, G.** (1995). “Geomorphology and Sedimentology of Estuaries.” *Developments in Sedimentology*, Vol 53, 1-16.
- Wang, C. F., Hsu, M. H., & Kuo, A.** (2004). “Residence time of the Danshuei River estuary, Taiwan.” *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, Vol 60, Issue 3, 381-393.