



# APROVECHAMIENTOS HIDROELÉCTRICOS DEL RÍO SANTA CRUZ

---

**PLAN DIRECTOR DE GESTIÓN AMBIENTAL**  
OA36  
PROGRAMA DE DEFINICIÓN DE LA ESTRATEGIA DE  
LLENADO DE EMBALSES (CAUDALES Y/O  
HIDROGRAMAS DE SOSTENIBILIDAD)

Influencia del llenado de los embalses en el estuario del  
Río Santa Cruz



Secretaría de Gobierno de Energía  
Ministerio de Hacienda  
Presidencia de la Nación



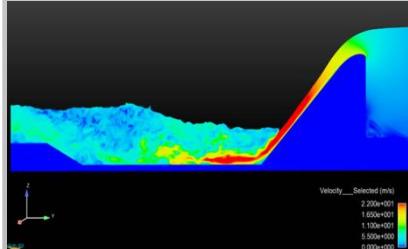
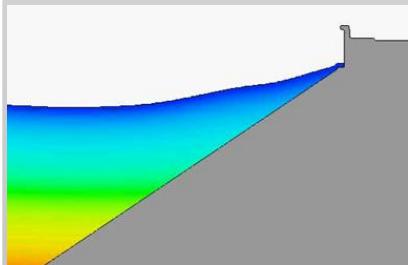
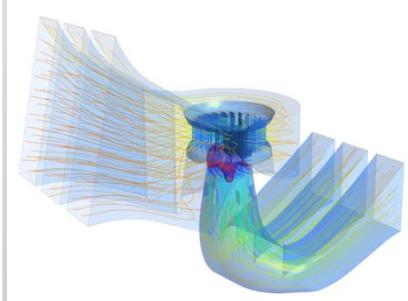
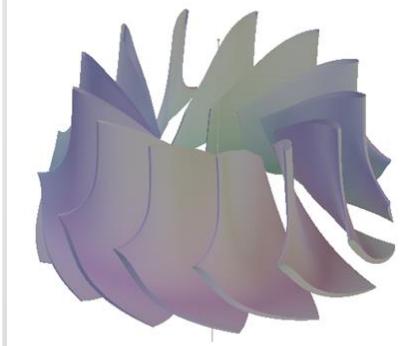
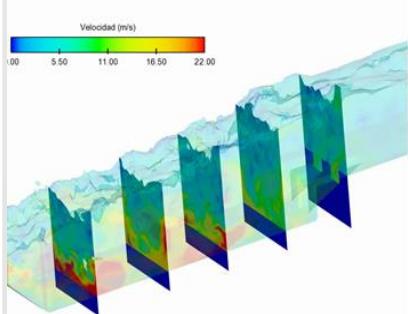
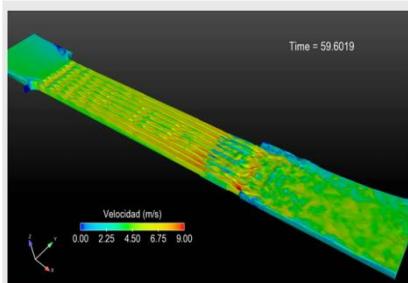
**INSPECCIÓN**  
Aprovechamiento Hidroeléctrico  
Del Río Santa Cruz  
Presas N. Kirchner-J. Cepernic



**Universidad Nacional de La Plata**  
Facultad de Ingeniería  
Departamento de Hidráulica

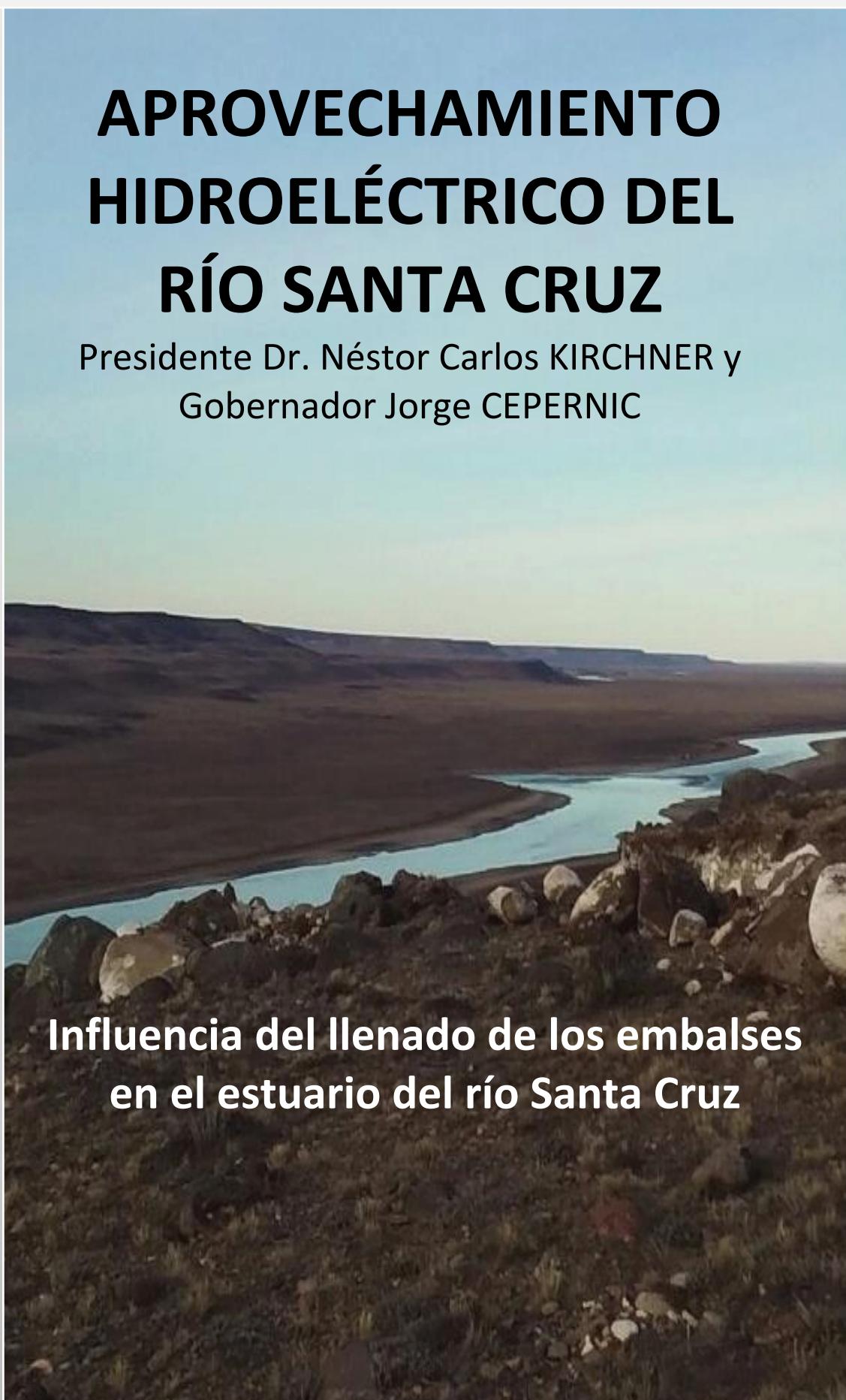


**Ministerio de Energía y Minería**  
Secretaría de Energía Eléctrica  
Subsecretaría de Energía Hidroeléctrica  
**Presidencia de la Nación**



# APROVECHAMIENTO HIDROELÉCTRICO DEL RÍO SANTA CRUZ

Presidente Dr. Néstor Carlos KIRCHNER y  
Gobernador Jorge CEPERNIC



**Influencia del llenado de los embalses  
en el estuario del río Santa Cruz**



**MINISTERIO DE ENERGÍA Y MINERÍA**  
**SECRETARIA DE ENERGÍA ELÉCTRICA**  
**SUBSECRETARÍA DE ENERGÍA HIDROELÉCTRICA**

---

**Obra: "APROVECHAMIENTOS HIDROELÉCTRICOS DEL RÍO SANTA CRUZ PRESIDENTE DR. NESTOR CARLOS KIRCHNER Y GOBERNADOR JORGE CÉPERNIC".-**

**Expte: S01:0146922/2012**

**Influencia del llenado de los embalses en el estuario del río Santa Cruz**  
 **Abril 2017**



**INSPECCIÓN**  
Aprovechamiento Hidroeléctrico  
del Río Santa Cruz  
Presas N. Kirchner-J. Cepernic

**Universidad Nacional de La Plata**



**Dirección:**  
Ing. Sergio O. Liscia

**Autores:**

Ings.

Mariano de Dios

Federico Zabaleta

Paula Consoli

Abril 2017



## CONTENIDO

1	INTRODUCCIÓN .....	4
2	OBJETIVOS .....	4
3	CONFIGURACIÓN DEL MODELO .....	4
4	RESULTADOS.....	5
1.1.	Niveles .....	5
1.2.	Salinidad .....	9
1.3.	Efectos de la marea en la IADS .....	12
1.4.	Comportamiento natural del estuario.....	14
5	CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES .....	16



## INFLUENCIA DEL LLENADO DE LOS EMBALSES EN EL ESTUARIO DEL RÍO SANTA CRUZ

### 1 INTRODUCCIÓN

El presente trabajo tiene su origen en el contrato realizado entre la Universidad Nacional de La Plata y el Ministerio de Energía y Minería de la República Argentina, para la Inspección del Aprovechamiento Hidroeléctrico del Río Santa Cruz, Presas N. Kirchner (NK) y J. Cepernic (JC). El mismo fue realizado en el Laboratorio de Hidromecánica del Departamento de Hidráulica de la Facultad de Ingeniería.

En el proyecto de las presas, es necesario analizar los impactos que tendrán en su entorno, y particularmente en el río Santa Cruz. En este estudio se analizó el impacto de las variables hidráulicas de la construcción y puesta en funcionamiento las presas NK y JC en el estuario del río Santa Cruz y la interfase Río Santa Cruz, Rio Chico y el estuario. Particularmente, en este informe se presentan los resultados de las modelaciones del mes de julio, época del año en la que el Macá Tobiano reside en el estuario.

### 2 OBJETIVOS

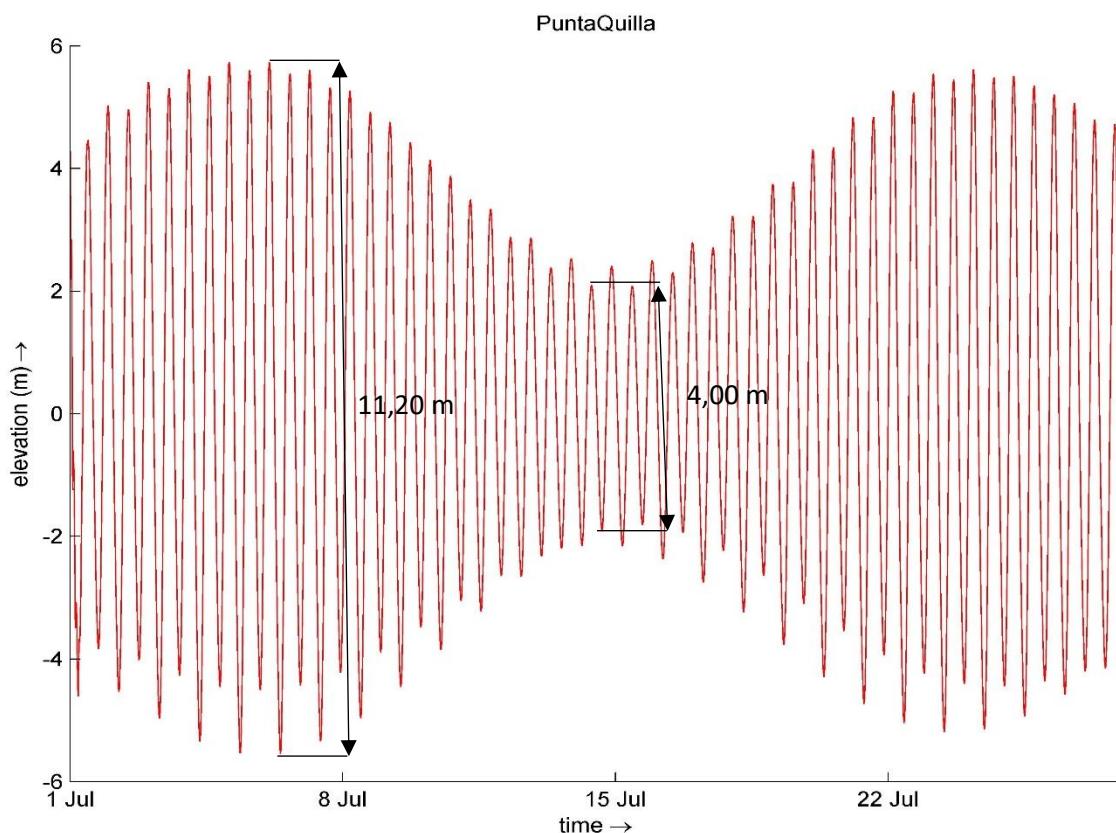
Para entender la problemática a estudiar, se simularán dos escenarios, siendo el escenario base el estado natural del Río Santa Cruz y el escenario modificado el que se realiza con la operación de las obras implantadas en el Río Santa Cruz, principalmente la represa J. Cepernic y en el momento de su llenado.

El objetivo de este trabajo es analizar la influencia de una reducción, temporal y parcial, de caudal en el Río Santa Cruz (producto del llenado del embalse de JC), en el comportamiento hidrodinámico del estuario del Río Santa Cruz. Se analizará la variación de los niveles, zonas de secado y mojado, y salinidad.

### 3 CONFIGURACIÓN DEL MODELO

Para evaluar los escenarios con y sin obras, se realizarán simulaciones del comportamiento hidrodinámico con un software de la especialidad, cuyo nombre es Delft3D, desarrollado por la DELTARES Holanda, que representen adecuadamente dichas situaciones. Las mismas simularán desde el 01/07/2016 hasta el 31/07/2016.

Las forzantes fluviales del modelo son los caudales del río Santa Cruz y del Río Chico, mientras que las forzantes oceánicas son las variaciones del nivel del agua producto de las mareas. El caudal del Río Chico y los niveles de las mareas son idénticos para ambos escenarios. El llenado del embalse de JC implicará, temporalmente, una reducción en el caudal natural del Río Santa Cruz durante el mes de julio, la diferencia entre ambos escenarios radicará en una disminución del mismo. Se asumirá para julio un caudal medio de 550 m<sup>3</sup>/s, y para el llenado un caudal extremo de 200 m<sup>3</sup>/s, con el fin de analizar la respuesta del estuario ante una situación extrema. Si bien los caudales naturales y los de llenado varían a lo largo del mes de julio, su variación es prácticamente insignificante ante la variación de las mareas. Por este motivo, se optó por simularlos como constantes durante todo el mes.



**Figura 3.1: Variación de niveles en Punta Quilla para el mes de Julio del 2016**

## 4 RESULTADOS

Durante julio de 2016, las mareas tienen amplitudes que varían desde 4,00 m hasta 11,20 m (Figura 3.1). En este análisis será de interés estudiar las mareas máximas y mínimas. Esto se justifica en el hecho que mareas intermedias darán como resultado condiciones en el estuario que se ubican entre las de generadas por las mareas extremas.

### 1.1. Niveles

En las Figura 4.1 a las Figura 4.8 se pueden ver los niveles de la superficie libre del agua respecto al nivel medio del mar. Fueron representados los niveles en pleamar y bajamar para las mareas extremas del mes de Julio del 2016 (es decir, 11,20 m y 4,00 m de amplitud). Dado que las mareas extremas generan situaciones de niveles y salinidad máximos y mínimos en el estuario, el análisis de estos puntos permite entender al estuario en sus condiciones límites. Por otro lado, los efectos de mareas de amplitudes intermedias en el estuario serán intermedios entre los generados en mareas extremas.

En todas las situaciones representadas no se detectan modificaciones apreciables en los niveles, ni en las zonas de mojado y secado. Esto significa que una reducción de caudal del río Santa Cruz no implicaría que zonas que antes se inundaban queden secas, o viceversa. Además, garantiza que se respeten los ciclos de mojado y secado naturales en las playas.



Estos resultados son producto de la gran influencia que tienen las mareas en los niveles del estuario, en comparación con la influencia que ejercen los ríos. La amplitud media de las mareas en esta zona es de 8.00 m, mientras que las variaciones de nivel por variaciones de caudal suelen ser del orden de centímetros. Es por este motivo que es de esperar que una variación de caudal no genere impactos en los niveles del estuario.

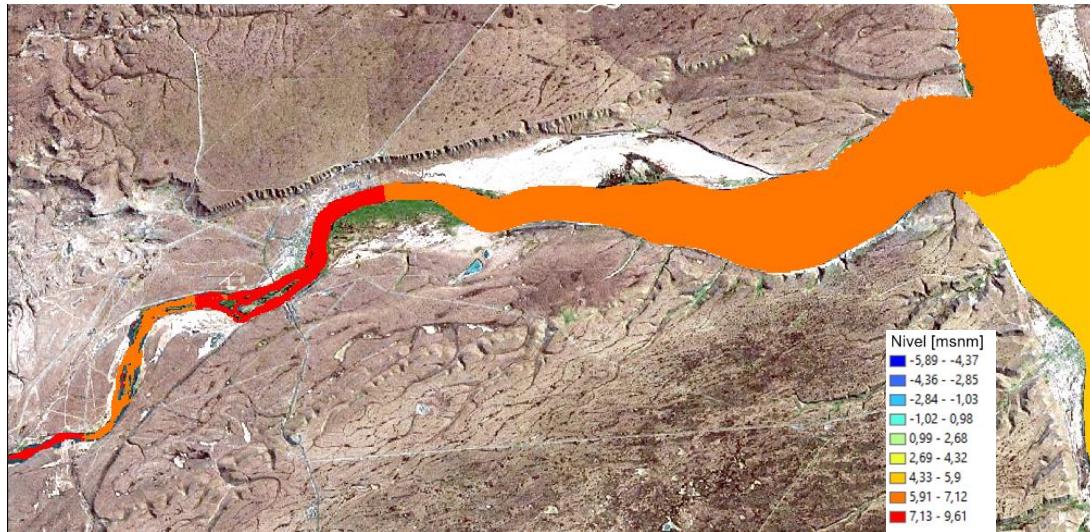


Figura 4.1: Nivel de la superficie libre en pleamar para escenario de  $Q_{sc}=550\text{m}^3/\text{s}$  y  $\Delta H=11,20\text{ m}$ .



Figura 4.2: Nivel de la superficie libre en pleamar para escenario de  $Q_{sc}=200\text{m}^3/\text{s}$  y  $\Delta H=11,20\text{ m}$ .

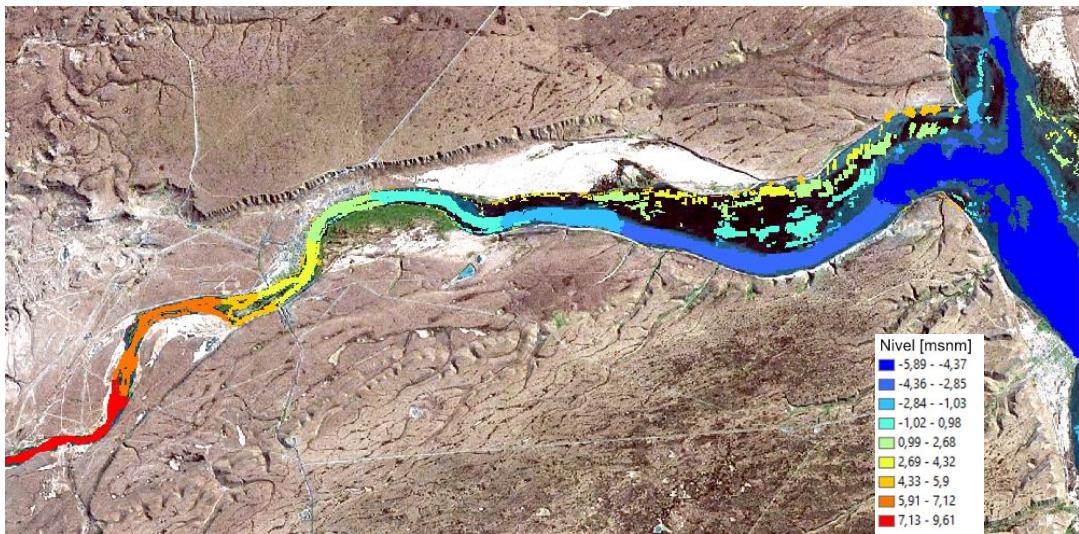


Figura 4.3: Nivel de la superficie libre en bajamar para escenario de  $Q_{SC}=550\text{m}^3/\text{s}$  y  $\Delta H=11,20\text{ m}$ .

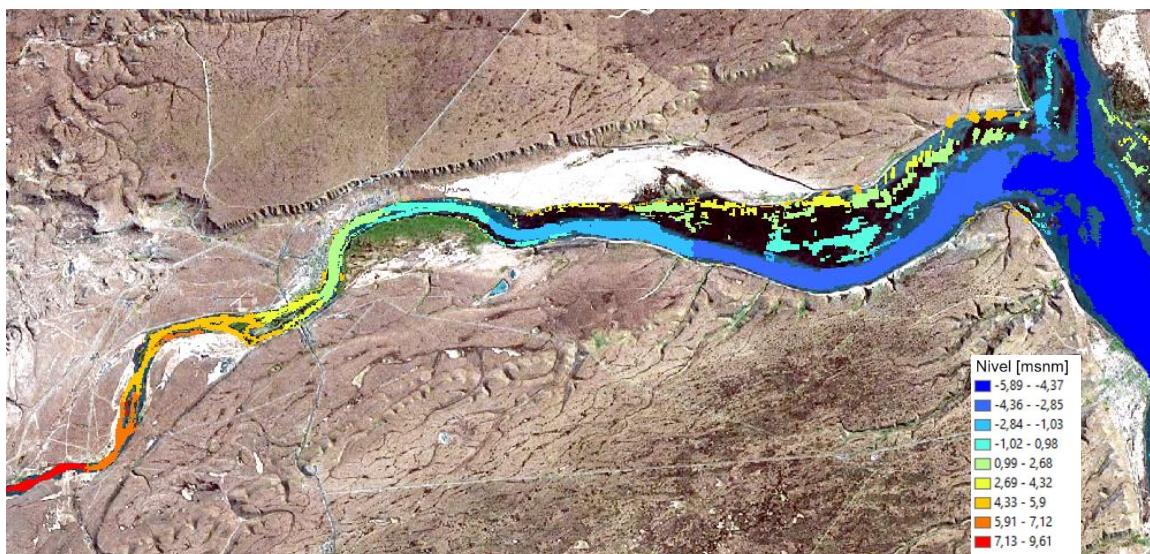


Figura 4.4: Nivel de la superficie libre en bajamar para escenario de  $Q_{SC}=200\text{m}^3/\text{s}$  y  $\Delta H=11,20\text{ m}$ .

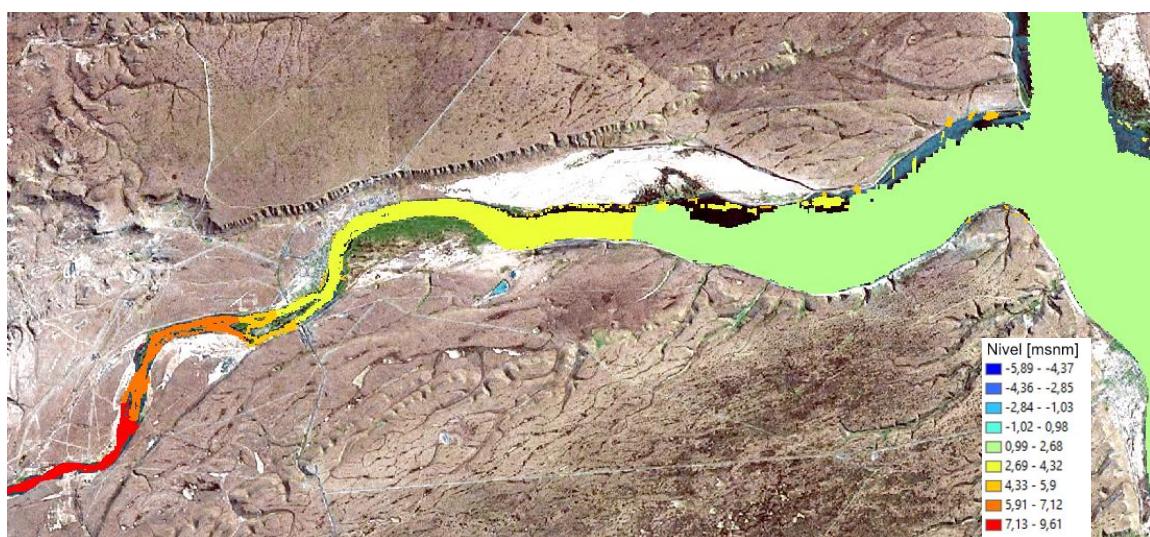


Figura 4.5: Nivel de la superficie libre en pleamar para escenario de  $Q_{SC}=550\text{m}^3/\text{s}$  y  $\Delta H=4,00\text{ m}$ .

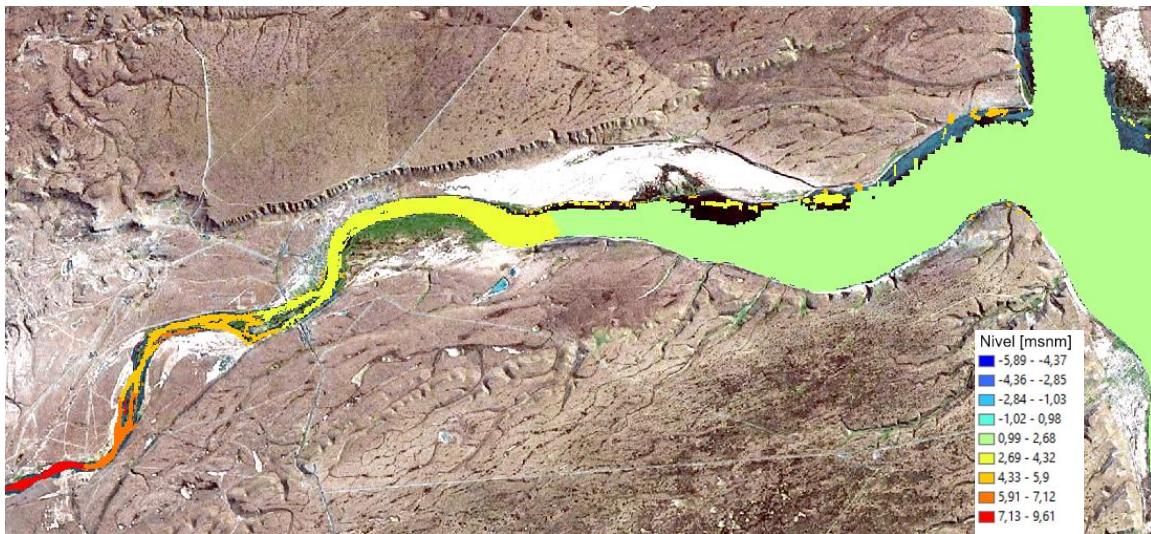


Figura 4.6: Nivel de la superficie libre en pleamar para escenario de  $QSC=200m^3/s$  y  $\Delta H=4,00 m$ .

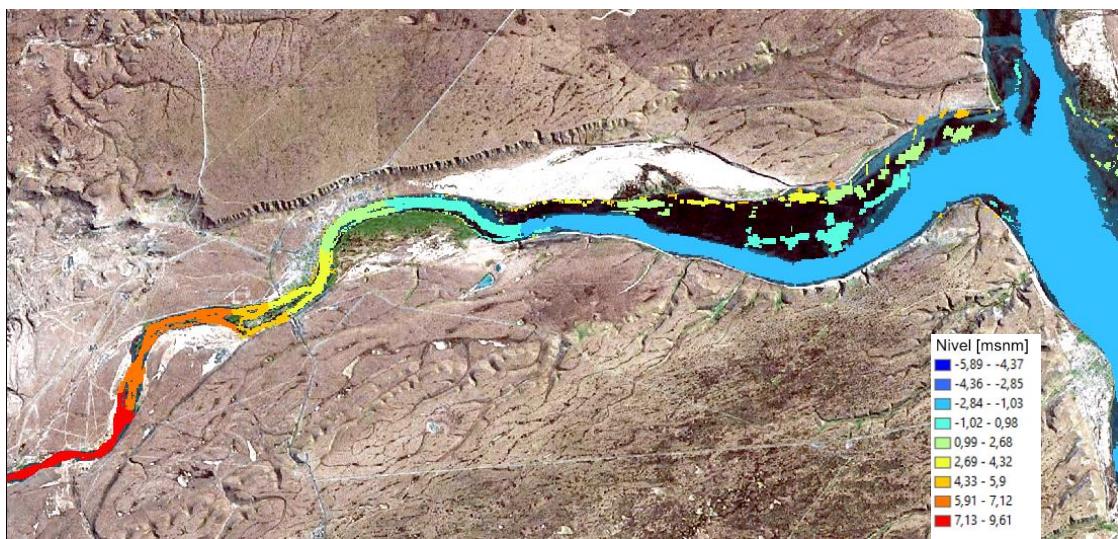


Figura 4.7: Nivel de la superficie libre en bajamar para escenario de  $QSC=550m^3/s$  y  $\Delta H=4,00 m$ .

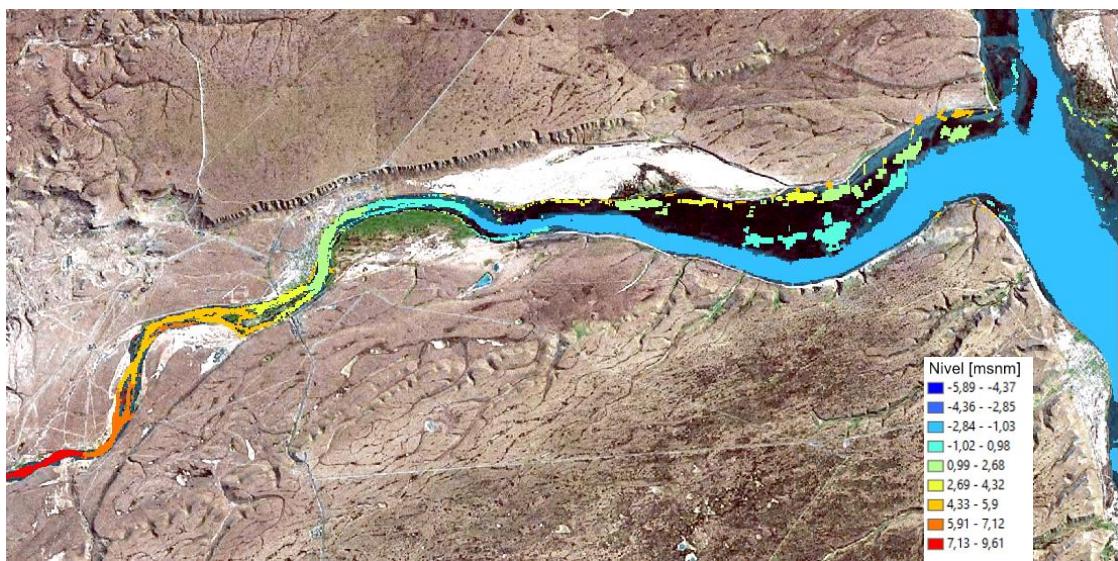


Figura 4.8: Nivel de la superficie libre en bajamar para escenario de  $QSC=200m^3/s$  y  $\Delta H=4,00 m$ .



## 1.2. Salinidad

En las Figura 4.9 a la Figura 4.16 se pueden ver los niveles de la superficie libre del agua respecto al nivel medio del mar. Fueron representados los niveles en pleamar y bajamar para las mareas extremas del mes de julio del 2016 (es decir, 11.20 m y 4.00 m de amplitud). Durante las pleamaras, la Interfaz entre Agua Dulce y Salada (IADS) sube hacia aguas arriba del río Santa Cruz, mientras que durante bajamar la misma baja hasta alcanzar zonas cercanas a la confluencia de los ríos Santa Cruz y Chico. Los escenarios de mareas máximas representan las posiciones extremas de la IADS, mientras que mareas de amplitud intermedia generan posiciones de la IADS que se ubican entre las extremas.

Para todos los casos representados, se puede apreciar que una reducción de caudal hace que la IADS se desplace aguas arriba del río Santa Cruz. Este desplazamiento será de longitud variable en función de las mareas. Este resultado se condice con la física del problema, ya que al reducir el caudal del río Santa Cruz se reduce la fuente de agua dulce, y por ende el agua salada proveniente del océano tiene más capacidad de entrar en el estuario.



Figura 4.9: Salinidad en pleamar para escenario de  $QSC=550\text{m}^3/\text{s}$  y  $\Delta H=11,20 \text{ m}$ .



Figura 4.10: Salinidad en pleamar para escenario de  $QSC=200\text{m}^3/\text{s}$  y  $\Delta H=11,20 \text{ m}$ .

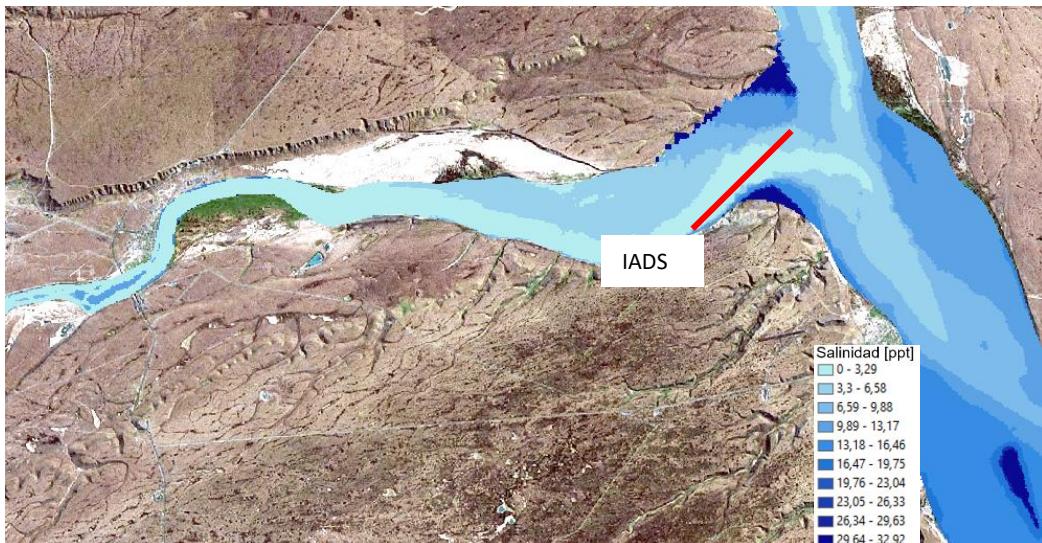


Figura 4.11: Salinidad en bajamar para escenario de  $QSC=550\text{m}^3/\text{s}$  y  $\Delta H=11,20 \text{ m}$ .



Figura 4.12: Salinidad en bajamar para escenario de  $QSC=200\text{m}^3/\text{s}$  y  $\Delta H=11,20 \text{ m}$ .

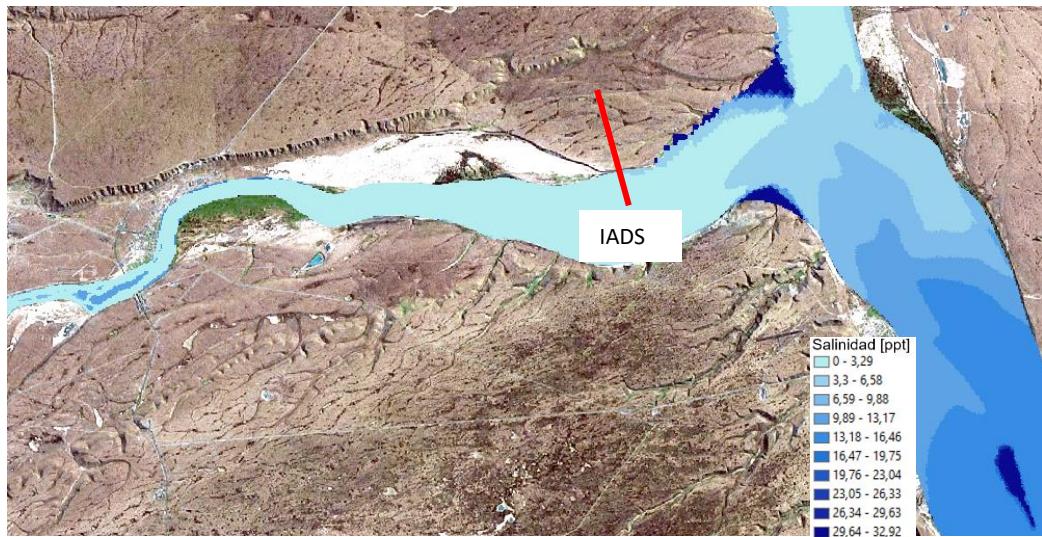


Figura 4.13: Salinidad en pleamar para escenario de  $QSC=550\text{m}^3/\text{s}$  y  $\Delta H=4,00 \text{ m}$ .

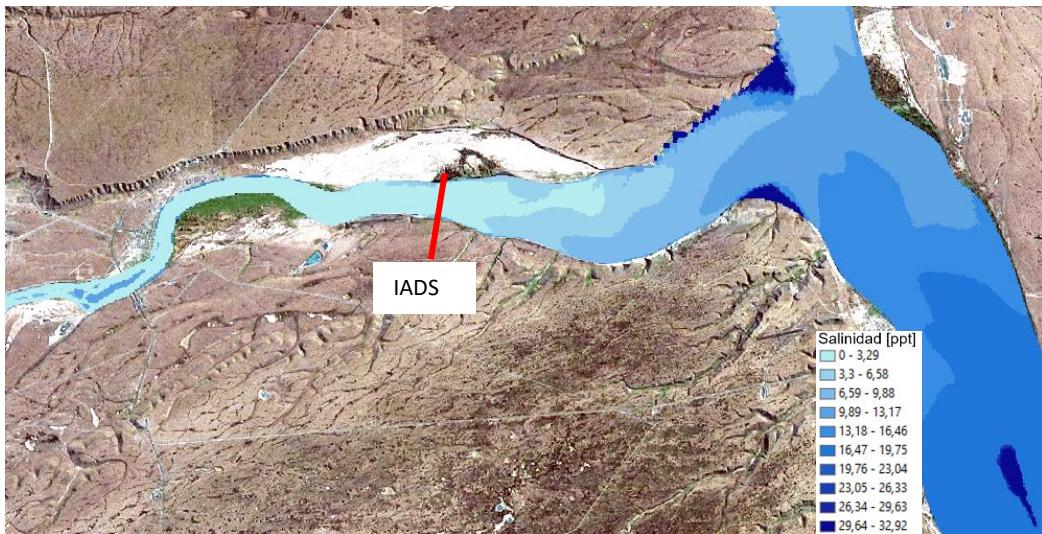


Figura 4.14: Salinidad en pleamar para escenario de  $QSC=200\text{m}^3/\text{s}$  y  $\Delta H=4,00 \text{ m}$ .

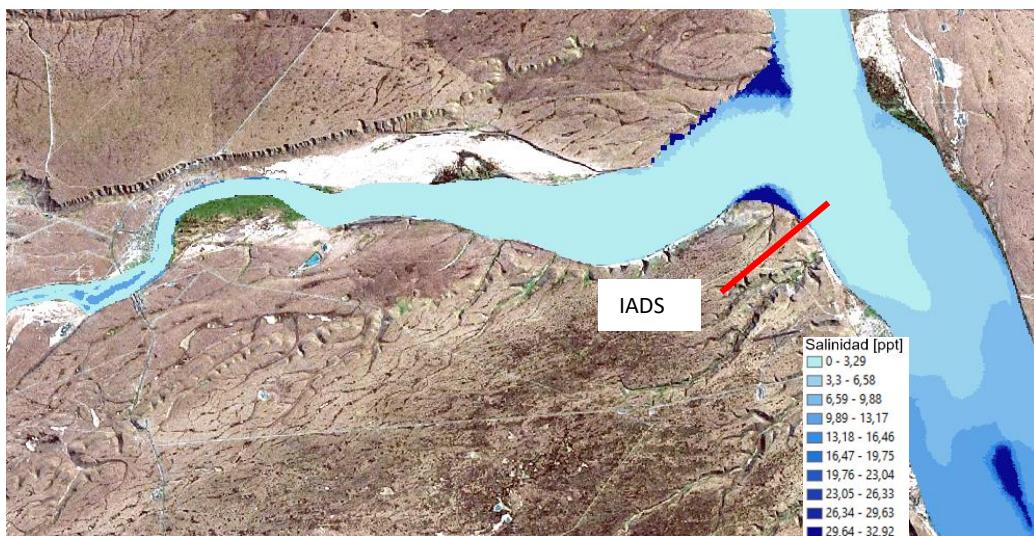


Figura 4.15: Salinidad en bajamar para escenario de  $QSC=550\text{m}^3/\text{s}$  y  $\Delta H=4,00 \text{ m}$ .

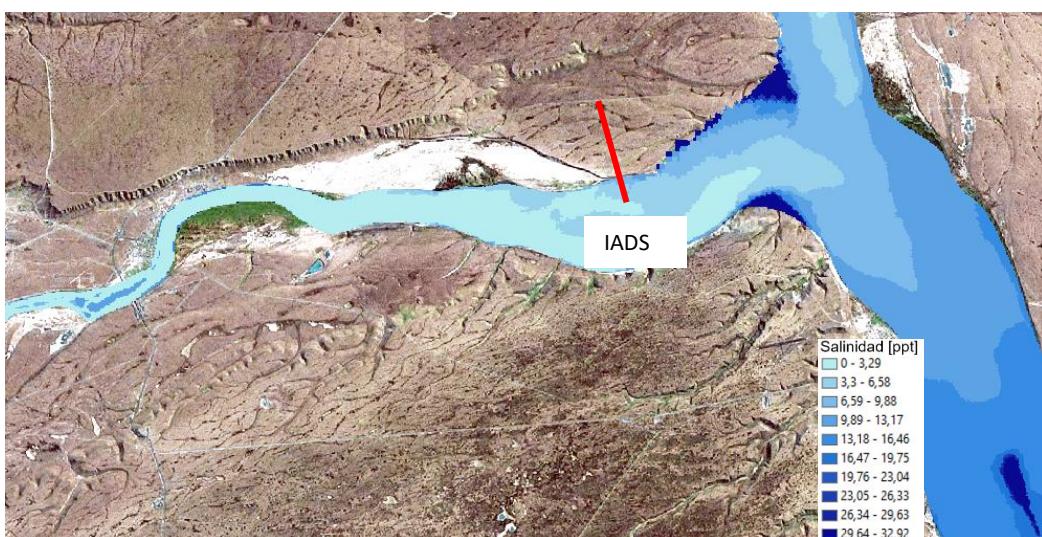


Figura 4.16: Salinidad en bajamar para escenario de  $QSC=200\text{m}^3/\text{s}$  y  $\Delta H=4,00 \text{ m}$ .



### 1.3. Efectos de la marea en la IADS

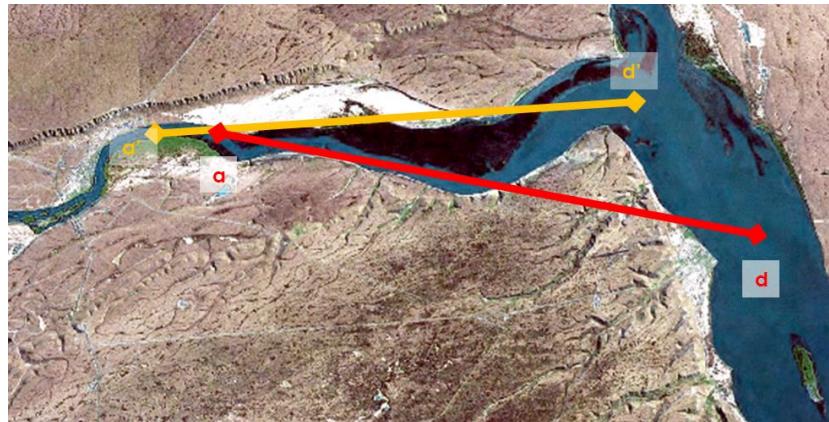
Habiéndose presentado las alteraciones que el llenado puede inducir en los caudales del Río Santa Cruz, no debe perderse de vista que en el área estudiada tienen lugar fluctuaciones semidiurnas de amplitud no despreciable de las variables monitoreadas, cuyo forzante son las oscilaciones de marea gobernadas por los astros. Es indispensable interpretar los resultados ya presentados teniendo en consideración las variaciones que ocurren de manera natural en las amplitudes de marea.

La sensibilidad de los resultados a los niveles de marea puede cuantificarse comparando la variación de la posición de la IADS durante un ciclo de marea. Dada la modulación de las amplitudes de marea astronómica, es pertinente contemplar los escenarios extremos del mes, correspondientes a los días en que se registraron las mareas de mayor y menor amplitud, tal como se presentan en la Figura 4.17. En el primer caso, cuando la amplitud de mareas es máxima y alcanza 11.20 m, la IADS se ubica en la posición *a* en pleamar y se desplaza 20 km aguas abajo hasta *b* en bajamar. En el segundo caso, cuando la amplitud de mareas es de 4.00 m, la forzante de las mareas ve reducido su efecto y el río es capaz de advectar la IADS hacia aguas abajo. En tal caso, la IADS se desplaza 9 km en un ciclo de marea, entre las posiciones *c* y *d*. Según se desprende de la Figura 4.18, en el mes de Julio de 2016 la IADS se posicionó entre el punto *a* en el Río Santa Cruz y el punto *d* aguas abajo de la confluencia de los ríos Santa Cruz y Chico, abarcando un desplazamiento total de unos 25 km.



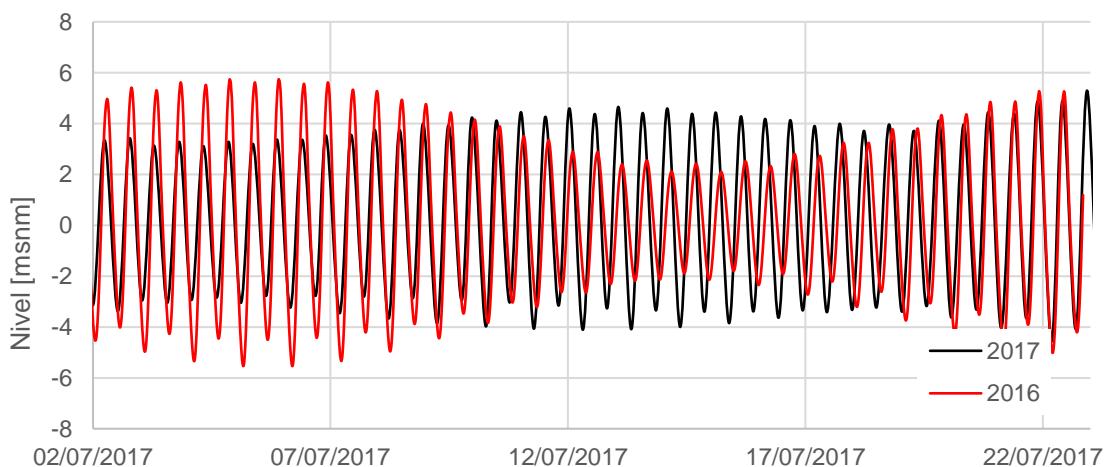
**Figura 4.17. Desplazamiento en un ciclo de marea de la IADS durante las mareas extremas del mes de julio de 2016.**  
Para una variación de niveles de 11.20 m, la posición de la IADS se situó durante pleamar en *a* y se desplazó hasta *b* en bajamar; mientras que cuando la amplitud fue de 4.00 m lo propio ocurrió desde *c* hasta *d*.

Considérese para el mismo período un escenario supuesto en que la presa se está llenando y se eroga hacia el río Santa Cruz un caudal de  $200 \text{ m}^3/\text{s}$ . El mismo análisis revela que a lo largo de todo el mes las posiciones extremas de la IADS están dadas por los puntos *a'* y *d'* de la Figura 4.18. La reducción de los caudales del Río Santa Cruz disminuye la capacidad de advectar el agua salada con respecto a la situación original, y resulta en un desplazamiento de la IADS unos 3 km hacia aguas arriba en el río, y alrededor de 7 km en el estuario. Si bien a priori la ubicación de la IADS para julio de 2016 presenta diferencias con y sin obra, aún resta interpretar este resultado en el contexto de mareas astronómicas cuya amplitud es diferente para mismos períodos de otros años.



**Figura 4.18. Posiciones extremas de la IADS durante el mes de julio de 2016. En un escenario sin presa, la IADS se desplaza entre a y d; mientras que de producirse el llenado de la presa las posiciones extremas de la IADS son a' y d'.**

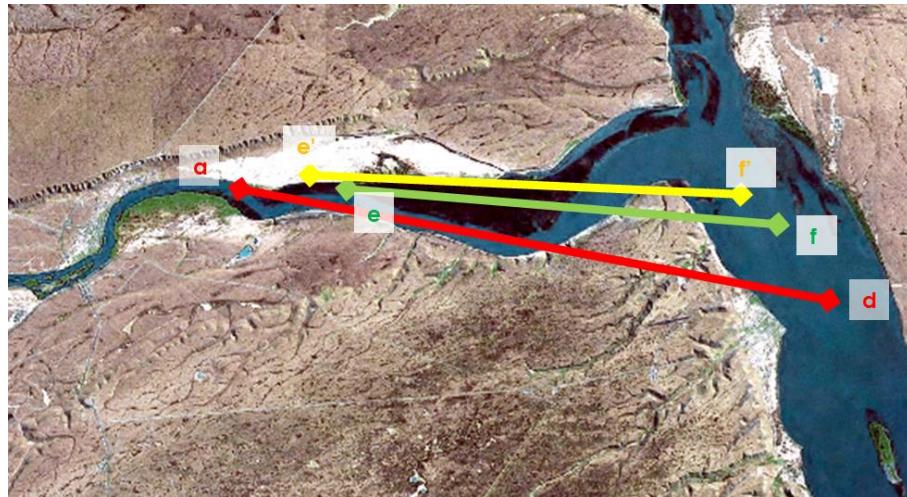
La fluctuación de mareas astronómicas según el año considerado puede apreciarse en la Figura 4.19, donde se compara para el mes de julio de los años 2016 y 2017. Para el año 2016, tal como se había descripto en la Figura 3.1, se aprecia una modulación de las amplitudes que provoca una oscilación semidiurna de niveles cuyos valores máximo y mínimo son 11.20 m y 4.00 m respectivamente. No obstante, si el período considerado es durante el año 2017, la diferencia de niveles entre mareas extremas se reduce, quedando éstas caracterizadas por variaciones diarias de cotas de entre 5.90 m y 8.70 m.



**Figura 4.19. Evolución temporal de los niveles en Punta Quilla durante el mes de julio, para dos años diferentes.**

La repetición del análisis de posiciones extremas de la IADS durante el mes de julio de 2017 es, por tanto, diferente a la presentada para el año 2016. Repitiendo el análisis previo, los resultados se vuelcan en la Figura 4.20. Los puntos e y f, correspondientes a las IADS extremas para Junio de 2017, están separados por una distancia menor que los desplazamientos entre a y d observados en 2016. En 2017 la menor amplitud de mareas resulta en que la posición extrema durante bajamar se ubica más aguas arriba (comparar f y d), mientras que la salinidad se introduce menos en el río (a y e). Para completar el análisis, se contempla el llenado del embalse durante Julio de 2017, representado por los puntos e' y f'. Llegado este punto es sumamente importante destacar que si bien el tramo ocupado por la IADS e'-f' se ubica aguas arriba respecto del e-f sin obras, la intrusión del agua salina en el río durante el llenado del embalse en 2017 no alcanza posiciones que hubiesen permanecido en situación actual durante el mismo mes del año anterior.

Se desprende que para valorar si el llenado puede provocar configuraciones que no se darían naturalmente con relativa recurrencia, es necesario presentar un diagnóstico que abarque las posiciones extremas de la IADS para el mes de julio a lo largo de algunos años.



*Figura 4.20. Posiciones extremas de la IADS para el mes de julio en diferentes años y escenarios. En situación sin intervención, la IADS se ubica entre a y d para el año 2016, entre f y g para 2017, y entre g y h para un año extremo. En caso de que el llenado del embalse ocurriese en 2017, la IADS se ubicaría entre e' y f'.*

#### 1.4. Comportamiento natural del estuario

Debido a lo dicho anteriormente, es claro que un año aislado no representa el movimiento natural de la IADS. Un año con mareas extremas hará que la IADS tenga una variación de posición apreciablemente mayor que uno con mareas medias. Esto hace que sea necesario analizar una serie de julios de varios años consecutivos, para poder hacer una descripción precisa de la variación de la posición de la IADS. Para esto haremos uso de un mes modelo que denominaremos Julio Extremo Natural.

Definimos al julio Extremo Natural (JEN) como un Julio en que las mareas toman valores extremos máximos y mínimos. Estos valores extremos tendrán una frecuencia de ocurrencia tal que no alteren el funcionamiento natural del estuario, ni de la biota que allí reside. Esta frecuencia deberá ser definida por un panel de expertos. En el JEN se podrá definir cuál es el rango normal de desplazamiento de la IADS mediante una simulación numérica, y a su vez esta podrá definir cuál serán los escenarios en los que la IADS se saldría de su posición normal.

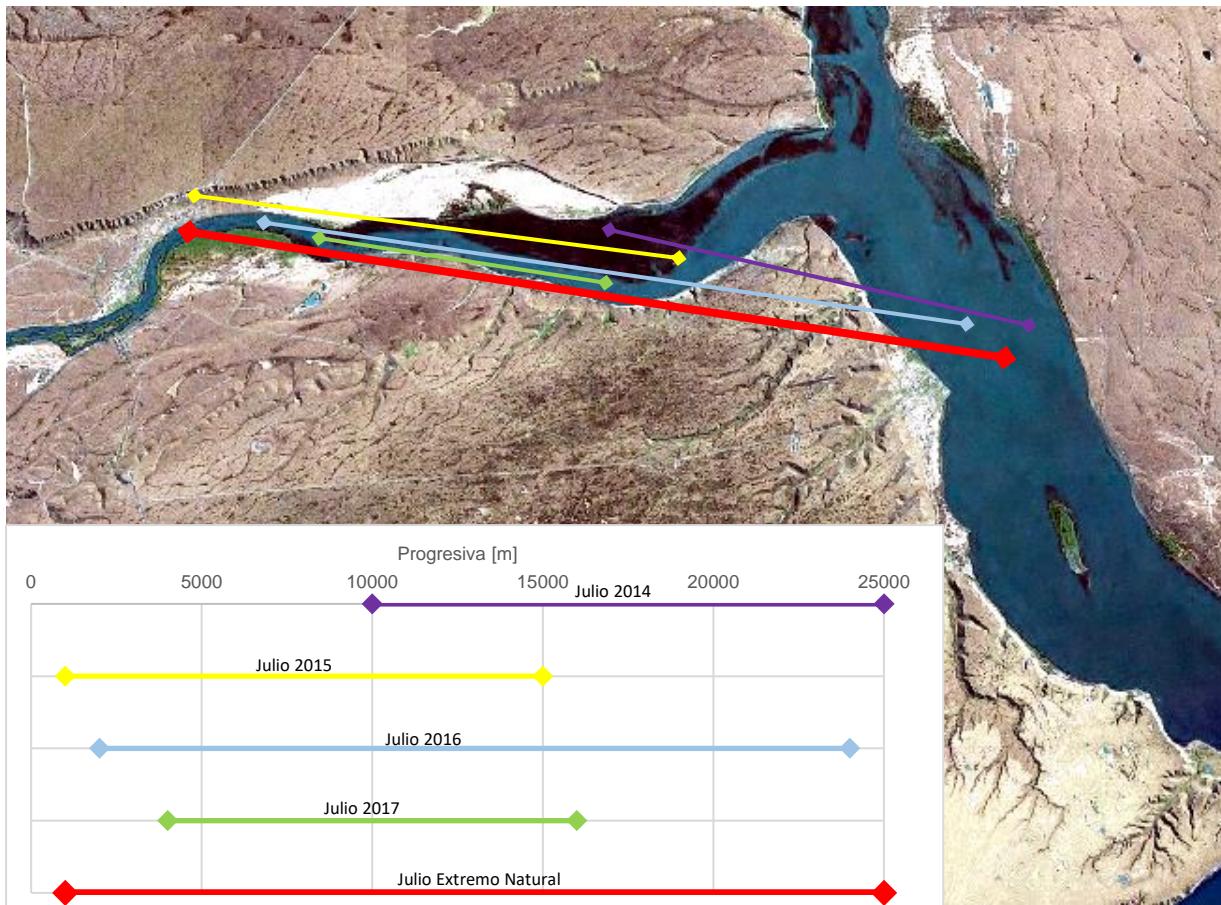
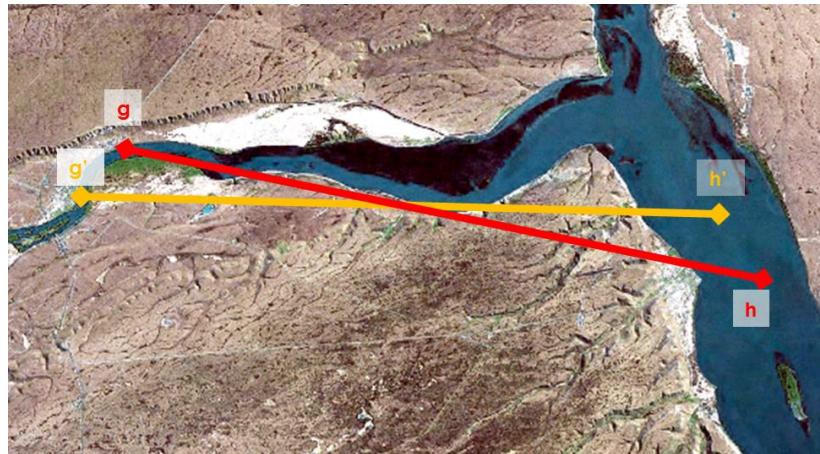


Figura 4.21: Variación de posición de la IADS durante los meses de julio en los años 2014 a 2017, y durante un JEN.

En la Figura 4.21 se puede ver la variación de posición de la IADS durante los meses de Julio en los años 2014 a 2017<sup>1</sup>, y durante un JEN. Se puede ver que a lo largo de los años, la IADS toma distintas posiciones y varía en distintos rangos. Por ejemplo, en el 2014 la misma se encuentra en la zona baja del río Santa Cruz mientras que en el 2015 en la zona alta. En julio del 2016 la IADS varía su posición en un rango mucho mayor que en los otros años, mientras que en el 2017 se encuentra más acotada. En base a esto, es posible definir el Julio Extremo Natural como la envolvente de todos estos resultados. En dicho mes, la IADS tomaría todas las posiciones que naturalmente tomaría durante una serie de años consecutivos.

Considerando entonces un escenario con un amplitud de mareas correspondiente a un JEN, se obtienen los resultados presentados en la Figura 4.22. Comparando la situación natural ( $g-h$ ) con la de llenado de los embalses ( $g'-h'$ ), se observa un desplazamiento de la IADS hacia aguas arriba. En situación de bajamar con amplitud mínima, la IADS  $h'$  se ubica dentro del sector que ocuparía naturalmente durante el mes de Julio, por lo que no implicaría una afectación en el comportamiento natural de la IADS. En cuanto al evento de pleamar  $g'$ , se observa una intrusión de la salinidad algo mayor. Este comportamiento difiere del normalmente encontrado en el estuario, dado que en condiciones normales la IADS alcanza intrusiones máximas que alcanzan el punto  $g$ . Esta situación se daría únicamente a lo largo de unos pocos días en que la amplitud de mareas es máxima, siendo insuficiente el caudal del río para contrarrestar las corrientes inducidas por la marea. No obstante, esta alteración de la situación normal puede revertirse si los caudales del río fuesen mayores, los suficiente para desplazar la IADS hasta  $g$ .

<sup>1</sup> El único año modelado es el 2016. Los años 2014, 2015 y 2017 son asumidos en función de las amplitudes de mareas de dichos años, y están ilustrados con el único propósito de ilustrar el concepto de Julio Extremo Natural.



**Figura 4.22. Posiciones extremas de la IADS para el mes de julio considerando un período de 4 años. Situación actual g-h y durante el llenado g'-h'.**

Si el llenado se efectuase en un año en que ocurriesen mareas astronómicas de amplitud extrema (cuya ocurrencia es fácilmente predecible, con más de un año de anticipación), para mantener la posición de la IADS dentro del sector que ocupa naturalmente bastaría con planificar la erogación de un caudal algo mayor durante unos pocos días. Cabe mencionar que si bien el ejemplo presentado corresponde a 4 años, queda a criterio de los expertos revisar el número de años a considerar para definir qué amplitudes extremas de marea pueden considerarse normales para las especies potencialmente afectadas.

## 5 CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

Se modeló el estuario del río Santa Cruz durante el mes de julio de 2016 para caudales del  $550 \text{ m}^3/\text{s}$  y  $200 \text{ m}^3/\text{s}$ . A partir de esta modelación fue posible tener una mejor comprensión del funcionamiento del mismo, y especialmente del comportamiento de la salinidad. Además, se permitió ver la influencia de la marea y el caudal en el comportamiento de la IADS.

A partir de los resultados se concluye que para la mayoría de los escenarios de marea no habría un impacto apreciable en el movimiento natural de la salinidad en el estuario. Esto es debido a que la mayor fuerza de movilización de la salinidad dentro del estuario es la marea, que tiene una magnitud muy superior a la del río.

Únicamente para condiciones de marea extrema, una reducción de caudal producto del llenado podría generar un ingreso de la IADS levemente mayor a la actual, cuyo efecto sobre la biota del estuario habría que estudiar.

En base a los resultados obtenidos este estudio se recomienda realizar el análisis de una mayor cantidad de años, para poder describir con precisión cuál es la posición normal de la IADS y así poder definir una condición de Julio Extremo Normal. Los resultados obtenidos hasta el momento, permiten predecir el comportamiento de manera general, y hacer una descripción de las posibles modificaciones en el funcionamiento en el estuario, pero no pueden cuantificarse.

En caso de que se detecte que hay una afectación, los pasos recomendados a seguir serán:

1. Analizar con al menos un año de anticipación si hay mareas extremas durante el llenado del embalse.
2. En caso de que no haya mareas extremas, el estuario no restringirá el régimen de llenado.



3. En caso de que haya mareas extremas, será necesario modificar la fecha o ritmo de llenado con el propósito de erogar un caudal suficiente para evitar la afectación del río Santa Cruz.