

## **Modelación bidimensional para determinación de zonas de inundación en el río Rapel, Chile**

Sebastián Ching Ch.<sup>1</sup>, Diego Caamaño A.<sup>2</sup>, Mauricio Villagrán V.<sup>3</sup>

### **RESUMEN:**

Los impactos en términos económicos y sociales asociados a las inundaciones, han hecho que en el país exista una mayor conciencia sobre este fenómeno, por lo que se hace necesario definir diferentes escenarios que podrían provocar inundaciones. Actualmente se están utilizando herramientas matemáticas que permiten cuantificar las características de estos fenómenos, e identificar las zonas inundables para los diferentes escenarios definidos.

Si bien las inundaciones son comúnmente producidas por factores meteorológicos, también es posible que ocurran debido a la intervención antrópica. En este trabajo se analiza si las variaciones de flujo en el río Rapel, controladas por la operación de la central hidroeléctrica del mismo nombre, podrían llegar a constituir un caudal de inundación.

Por lo tanto, se realiza una modelación hidráulica mediante la componente unidimensional del software HEC-RAS para los últimos 18 km del río, considerando desde el puente Rapel hasta la desembocadura con el océano Pacífico. Los resultados se utilizan para definir el área de inundación más probable, luego se repite el escenario de inundación pero utilizando el módulo bidimensional disponible en la nueva versión de HEC-RAS. Los resultados muestran diferencias significativas para un mismo escenario (i.e. definiciones de caudal y dominio), siendo éstas sensibles al tipo de discretización espacial.

### **ABSTRACT:**

The economic and social impacts associated with flooding have made the country more aware of this phenomenon, so it is necessary to define different scenarios that could lead to flooding. Currently, mathematical tools are being used to quantify the characteristics of these phenomena, and to identify the flood zones for different defined scenarios.

While floods are commonly produced by meteorological factors, they may also occur due to anthropic intervention. In this article, it is analyzed if the flow variations in the Rapel River, controlled by the operation of the hydroelectric power station of the same name could constitute a flood flow.

Therefore, a hydraulic modeling is performed using the one-dimensional component of the HEC-RAS software for the last 18 km of the river, considering from the bridge Rapel to the mouth of the Pacific Ocean. The results are used to define the most likely flood area, then the flood scenario is repeated but using the two-dimensional module available in the new version of HEC-RAS. The results show significant differences for the same scenario (i.e. flow and domain definitions), which are sensitive to the spatial discretization type.

---

<sup>1</sup> Estudiante, Carrera de Ingeniería Civil, Universidad Católica de la Santísima Concepción, CHILE, [seching@ing.ucsc.cl](mailto:seching@ing.ucsc.cl)

<sup>2</sup> Profesor Asistente, Departamento de Ingeniería Civil, Universidad Católica de la Santísima Concepción, CHILE, [dcaamano@ucsc.cl](mailto:dcaamano@ucsc.cl)

<sup>3</sup> Profesor Asistente, Departamento de Ingeniería Civil, Universidad Católica de la Santísima Concepción, CHILE, [mwillagran@ucsc.cl](mailto:mwillagran@ucsc.cl)

## 1. INTRODUCCIÓN

En Chile, alrededor de un 38% de la matriz eléctrica se compone de la energía procedente de centrales hidroeléctricas (SIC, 2010). Si bien estas centrales resultan altamente ventajosas en términos de disponibilidad y rentabilidad, al depender de un recurso relativamente inagotable como es el agua, también es necesario considerar las alteraciones que pudiera producir su funcionamiento en las condiciones normales de un cauce.

El embalse Rapel, construido en el año 1968 y que da origen al lago del mismo nombre, es una obra hidráulica perteneciente a la empresa ENDESA Chile S.A., y cuenta con un caudal de diseño de 535 m<sup>3</sup>/s utilizado para abastecer de energía al Sistema Interconectado Central (SIC); sin embargo, el caudal medio anual utilizable en un año medio es de 178 m<sup>3</sup>/s (DGA, 2004). El río Rapel es formado aguas abajo, en consecuencia de las aguas utilizadas para la generación eléctrica y aquellas que son evacuadas por los vertederos de la presa. Dado que este río se forma por las aguas provenientes de la central, no posee un régimen definido y puede llegar a presentar épocas de sequía en los periodos en que no se genera energía (de la Fuente, 2003), o en el caso contrario, evacuar grandes cantidades de agua, generando inundaciones aguas abajo.

A causa de lo anterior, las localidades ubicadas a lo largo del río se han visto afectadas en varias ocasiones por la operación de la central. El último gran evento, fue el ocurrido durante la madrugada del 12 de julio del año 2006, en la localidad de Rapel de Navidad dejó 32 viviendas con daños y 128 personas damnificadas, y hacia La Boca y La Vega afectó 20 viviendas y 20 personas damnificadas, sin víctimas fatales. (ONEMI, 2008). Eventos como este ya habían sido datados en los años 1975, 1982, 1985, 1986, 1992 y 1997, con consecuencias similares en amplitud, poniendo en evidencia el estado de vulnerabilidad de estas localidades. De acuerdo a los resultados del Censo Nacional de Población y Vivienda 2002, la comuna de Navidad presenta una densidad promedio de 18 habitantes por km<sup>2</sup>

Por lo tanto, dado que el caudal del río Rapel depende únicamente del manejo del flujo por parte de la central Rapel, se hace necesario el considerar los efectos que pueda tener un vaciamiento repentino o controlado del embalse, sobre toda la zona ubicada aguas abajo de su compuerta.

Consecuentemente, este estudio considera la regulación de caudales de la central Rapel en una zona de modelación espacialmente definida entre el puente Rapel y la desembocadura del río con el océano Pacífico (Figura 1), donde además se indican las principales localidades. De acuerdo a los resultados del Censo Nacional de Población y Vivienda 2002, la comuna de Navidad presenta una densidad promedio de 18 habitantes por km<sup>2</sup>

Se dispone de los datos de topografía y batimetría de la zona. Los caudales porteados se obtienen por medio de la caracterización de la producción eléctrica de la central.



**Figura 1:** Distribución espacial de la Central Rapel y la zona de estudio (Puente Rapel Navidad hasta la Desembocadura del río).

## 2. MÉTODOS

### 2.1 Herramienta computacional

Para la modelación en este estudio se utilizó el software HEC-RAS 5.0.3, el cual para el caso de modelos unidimensionales permite al usuario realizar cálculos hidráulicos unidimensionales en causes abiertos y establecer modelaciones de flujo estacionario y no estacionario así como también cálculos de transporte de sedimentos en fondos y paredes erosionables.

En el caso de un modelo estacionario, el software calcula perfiles de superficie de agua desde una sección transversal hacia la siguiente mediante la resolución de la ecuación de energía. El proceso iterativo en el que se calcula se denomina método del paso estándar. La ecuación de energía se describe en (1).

$$Z_2 + Y_2 + \frac{a_2 V_2^2}{2g} = Z_1 + Y_1 + \frac{a_1 V_1^2}{2g} + h_e \quad (1)$$

Dónde:

- $Z_2, Z_1$ : Cota de terreno de secciones transversales.
- $Y_2, Y_1$ : Altura de agua en secciones transversales
- $V_2, V_1$ : Velocidades promedio de la sección
- $a_2, a_1$ : Coeficientes de ajustes de velocidades
- $g$ : Aceleración de gravedad.
- $h_e$ : Pérdida de carga

Para modelos no estacionarios HEC-RAS resuelve las ecuaciones de Saint-Venant en una dimensión, que consiste en un sistema de ecuaciones en derivadas parciales formado por la ecuación de continuidad y la de momentum.

En el análisis de flujos no estacionarios, las leyes físicas que gobiernan estos escurrimientos son: El principio de conservación de la masa (continuidad) y el principio de conservación de momentum (cantidad de movimiento). La representación de estas leyes en forma de ecuaciones diferenciales parciales aplicadas a un volumen de control son:

La ecuación de continuidad

$$\frac{\partial Q}{\partial x} + \frac{\partial A}{\partial t} = q \quad (2)$$

Dónde:

$A$ : Área transversal total.

$Q$ : Caudal.

$q$ : Caudal por unidad de longitud.

La ecuación de momentum

$$\frac{\partial Q}{\partial t} + \frac{\partial QV}{\partial x} + gA \left( \frac{\partial z}{\partial x} + Sf \right) = 0 \quad (3)$$

Dónde:

$V$ : Velocidad media.

$g$ : Aceleración de la gravedad.

$\frac{\partial z}{\partial x}$ : Pendiente de la superficie libre del agua.

$Sf$ : Pendiente de energía.

La solución numérica de las ecuaciones se realiza a través de un esquema de diferencias finitas implícito, donde la función y sus derivadas son evaluadas al interior de cada celda de cálculo. Al final, se resuelve un sistema de ecuaciones simultáneas para el tramo de río analizado con el esquema de Preissmann de los cuatro puntos.

En el caso bidimensional, HEC-RAS tiene la capacidad de realizar modelaciones 2D, o combinaciones de modelos 1D y 2D, además de mostrar de manera explícita sus resultados en un mapa mediante la interfaz RAS MAPPER. Dentro de sus características principales, se destacan las siguientes

- Emplea las ecuaciones de Saint-Venant y Onda Dinámica en 2D.
- Esquema numérico empleado: Volúmenes Finitos.
- Algoritmo de solución implícito para el acoplamiento de modelos 1D y 2D.
- Mallas computacionales estructuradas y no estructuradas.
- Tabla detallada de propiedades hidráulicas para celdas y contornos de celdas computacionales 2D, que permiten acelerar los tiempos de cálculo.

La ejecución de un modelo 2D, requiere de una serie de configuraciones previas, tales como, el tamaño de malla y el paso de tiempo de cálculo. Ambos influyen directamente en la convergencia y precisión de los resultados.

El tamaño de malla ( $\Delta x$ ); define como el modelo representará la variabilidad topográfica y batimétrica del terreno en el cálculo matemático. Consecuentemente, valores altos de  $\Delta x$  disminuirían el número de cálculos realizados y consecuentemente el tiempo para llevarlos a cabo; sin embargo, se estaría promediando un área del relieve real que podría presentar variaciones de forma esto implica que el modelo estaría utilizando un dominio plano en circunstancias que la forma real es variable. Esta es la razón por la cual el proceso de definición del tamaño de la malla corresponde a un proceso iterativo, en que se busca el óptimo para la representación del terreno, la calidad de la solución matemática (requerida según los objetivos del estudio), y el tiempo de cálculo necesario para llevar a cabo la simulación.

El paso de tiempo de cómputo ( $\Delta t$ ), está relacionado al Número de Courant, que se obtiene de la relación con la discretización espacial utilizada ( $\Delta x$ ) y la velocidad del flujo.

La relación entre el Número de Courant, y los parámetros descritos anteriormente, para el método implícito, se describen en la ecuación (4).

$$C = \frac{V \cdot \Delta T}{\Delta X} \leq 1 \quad (4)$$

Dónde:

- C: Número de Courant
- V: Velocidad del flujo
- $\Delta T$ : Paso de tiempo computacional
- $\Delta X$  : Tamaño de celda promedio

## 2.2 Modelación

Primeramente, se realiza un modelo unidimensional de todo el cauce del río sobre la base de información batimétrica levantada en terreno, de lo cual se obtiene un modelo estacionario y uno no estacionario unidimensional, de esta manera se pueden contrastar ambas situaciones para identificar posibles desbordes.

La condición de entrada para la modelación unidimensional no estacionaria, corresponde el hidrograma de caudales registrados desde el 10 hasta el 13 de julio del 2006, periodo donde ocurrió la última crecida. Para el caso del modelo estacionario, se utiliza el caudal peak alcanzado en el hidrograma anterior.

En cuanto a la condición de salida de ambos modelos, que para este caso es el nivel del mar en la desembocadura, se obtiene en primer lugar la predicción de marea para el mismo periodo utilizado para el hidrograma. Con el objetivo de determinar el grado de sensibilidad del modelo unidimensional frente a la condición de borde de salida, se realizaron 3 simulaciones estacionarias, en donde se considerarán el nivel medio del mar (NMM), el nivel mínimo y el nivel máximo alcanzado.

Para graficar el impacto de la marea en el modelo, se muestran los perfiles hidráulicos longitudinales de los posibles escenarios considerados anteriormente en modelo unidimensional, para luego comparar las variaciones en las superficies de aguas resultantes, y hasta qué distancia desde la desembocadura hacia aguas arriba influye esta condición.

Una vez obtenidos los resultados de estos modelos unidimensionales, se determinan las principales zonas de desborde de cauce a lo largo del río, priorizando las zonas donde exista una mayor población. Dichas zonas se consideran como los dominios de las eventuales áreas de modelación 2D, con el fin de definir la variación espacial de las velocidades del flujo y de profundidades en las zonas críticas.

Las condiciones de borde a establecer en la malla 2D se extraen de los resultados del modelo unidimensional no estacionario, por lo que se ingresó como condición de entrada, el mismo hidrograma de caudales, y en la condición de borde de salida, se utilizaron las cotas de agua de la sección transversal que coincidan con el borde de salida de la malla 2D. Además, se realizan simulaciones considerando caudales extremos, asociados a distintos periodos de retorno.

En cuanto al tamaño de celdas de la malla, se probó generando mallas con distintos tamaños de celda con el fin de observar la variación en los resultados, y además determinar hasta qué punto las dimensiones de las celdas son influyentes en la representación de los resultados.

Con lo anterior, se pretende identificar y delimitar la zona que presente una mayor superficie inundada, y que represente un riesgo para los habitantes dentro del área de estudio.

### 2.3 Batimetría y topografía

Como información topográfica base, se utilizó un modelo de elevación digital DEM obtenido desde el sitio web del USGS (<https://earthexplorer.usgs.gov>). Esta topografía se complementó con datos de levantados en terreno durante el año 2015. Los instrumentos utilizados en este levantamiento consistieron en una ecosonda *Hi Target HD 370* sincronizada con un GPS RTK Marca Spectra Precision modelo EPOCH 80. De esta manera se obtuvieron registros simultáneos de la de cota de la superficie del agua y la profundidad del flujo en todo el dominio de modelación.

### 2.4 Definición del parámetro de rugosidad

El coeficiente de rugosidad de Manning ( $n$ ) a utilizar en la modelación será en primera instancia, el valor propuesto por Balboltín (2013), el cual realiza una estimación de éste coeficiente a partir de curvas granulométricas de sedimentos en los afluentes del embalse, y de la fórmula empírica de Strickler (1923), la cual se describe en la expresión (5).

$$K = \frac{1}{n} = \frac{21.1}{\frac{1}{d_{50}^6}} \quad (5)$$

Dónde:

$n$ : Coeficiente de Manning

$d_{50}$ : Diámetro medio de la partícula [m].

Los resultados obtenidos fueron contrastados con coeficientes ya establecidos en zonas de similares características, utilizando como guía el documento de la USGS “*Roughness characteristics of natural channels*”. El valor utilizado para el cauce fue de 0.03.

### 2.5 Cuantificación de los Caudales

Para la determinación los caudales a ingresar como condición de entrada del modelo, se utilizaron datos de operación real de la central obtenidos desde el Sistema Interconectado Central ([www.cdec-sic.cl](http://www.cdec-sic.cl)). Aquí se detallan las potencias medias horarias desde el año 2000 hasta la fecha, con sus respectivas cotas de embalse.

A partir de estos registros de potencias generadas se pueden determinar las variaciones a nivel horario del efluente de la central, considerando que la potencia producida se relaciona directamente con el caudal turbinado por medio de la ecuación (6).

$$P = n \cdot \rho \cdot g \cdot Q \cdot (H - z_e) \quad (6)$$

Dónde:

P:Potencia eléctrica generada [MWh].

n: Eficiencia de la turbina

g : Aceleración de gravedad [ $\text{m/s}^2$ ].

$\rho$ : Densidad del agua [ $\text{kg/m}^3$ ].

Q: Caudal turbinado [ $\text{m}^3/\text{s}$ ].

$H_n$ : Cota de embalse respecto al nivel del mar [m].

$z_e$ :Elevación de turbina [m].

De esta manera, se obtuvieron caudales horarios para un periodo de 15 años (2000 – 2015). A partir de esta información, se realizó un análisis de frecuencia con el que se determinan los caudales asociados a periodos de retorno T de 10, 50 y 100 años ajustando una función de distribución probabilística a la serie de caudales, y cuyos resultados se utilizaron como condición de borde de entrada para el modelo bidimensional. Se realizó un ajuste de datos a diferentes funciones de distribución teóricas, siendo estas Normal, Log-Normal, Weibull y Gamma.

## 2.6 Marea

La condición de borde de aguas abajo del modelo no estacionario corresponde a los niveles de marea en la desembocadura. Como no existe un mareógrafo ubicado en la desembocadura, se utilizaron para el análisis de marea los registros de la estación de Valparaíso, ubicada al norte de Rapel (ver figura 2). De esta manera, se obtuvo la variación del nivel del mar para el periodo de tiempo escogido para la modelación no estacionaria. Los registros de marea se obtuvieron desde el sitio web del *Sea Level Station Monitoring Facility* (<http://www.ioc-sealevelmonitoring.org/>).



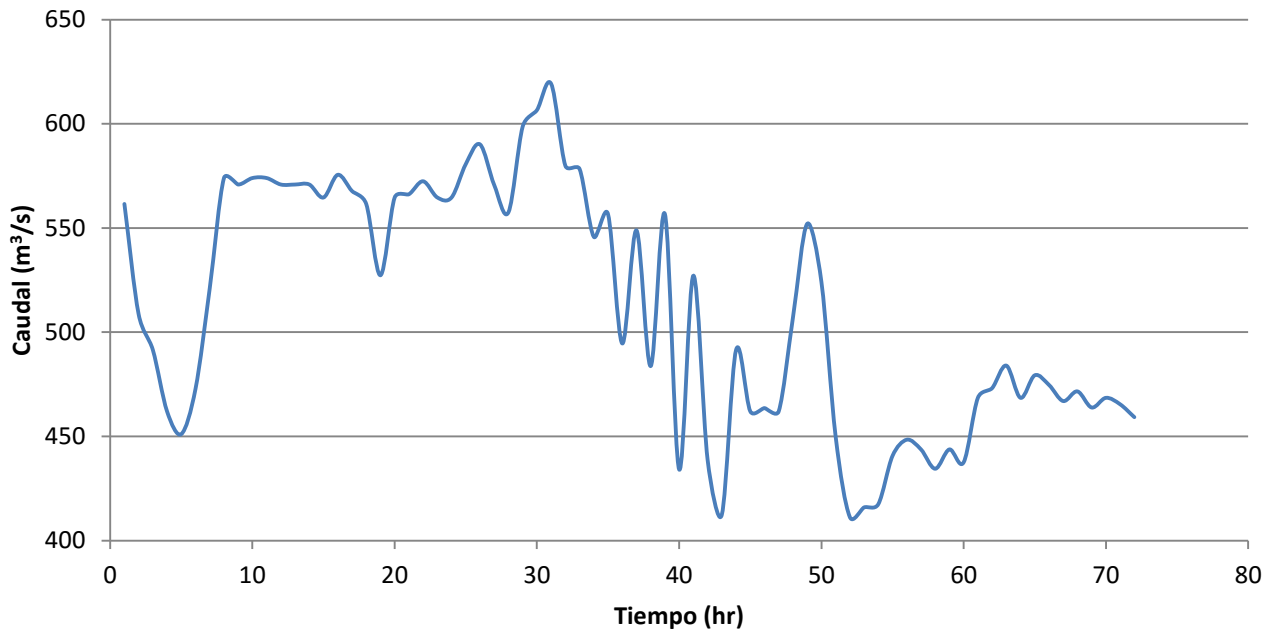
**Figura 2:** Ubicación mareógrafo.

Dado que las mediciones disponibles comienzan desde el año 2007, se realiza la predicción correspondiente al periodo de la crecida del 2006 mediante una rutina en el software MATLAB. Esta rutina realiza un análisis armónico de mareas de los datos registrados, y obtiene los distintos componentes de marea astronómica, y con ellos predice para un periodo determinado, una variación de nivel de marea.

### 3. RESULTADOS.

#### 3.1 Caudales

De la transformación realizada con la ecuación (6), se obtuvo el siguiente hidrograma para el periodo de crecida del 2006, donde el caudal peak obtenido resulto de  $619.21 \text{ m}^3/\text{s}$ .



**Figura 3:** Hidrograma de caudales periodo 10 al 13 de julio del 2006.

Se observa el vaciado de una gran cantidad de agua por periodos prolongados en el río Rapel, lo que explica lo ocurrido durante el año 2006 en las localidades aledañas.

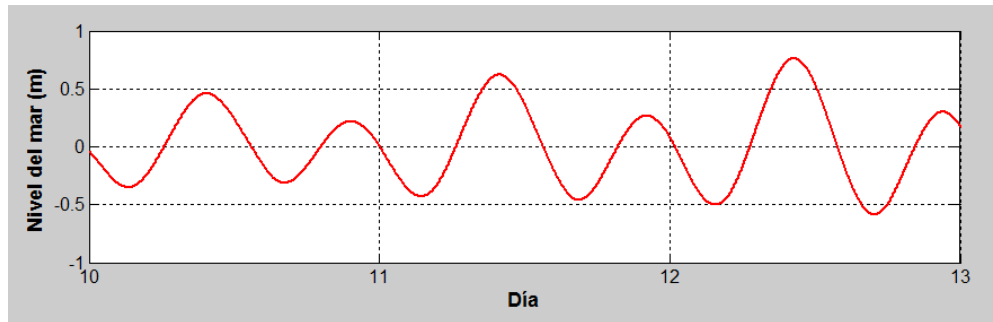
Del análisis de frecuencia de caudales, considerando 15 años de registro, se obtienen los siguientes caudales extremos asociados periodos de retorno de 10 50 y 100. La función que mejor se ajustó a los datos resultó ser la función Log- Normal.

**Tabla 1:** Caudales asociados a periodos de retorno.

Periodo de retorno T	Caudal (m <sup>3</sup> /s)
10	641.9811
50	665.115
100	701.662

### 3.2 Marea

Las variaciones de nivel del mar entregadas por el análisis de marea se muestran gráficamente en la figura 3.



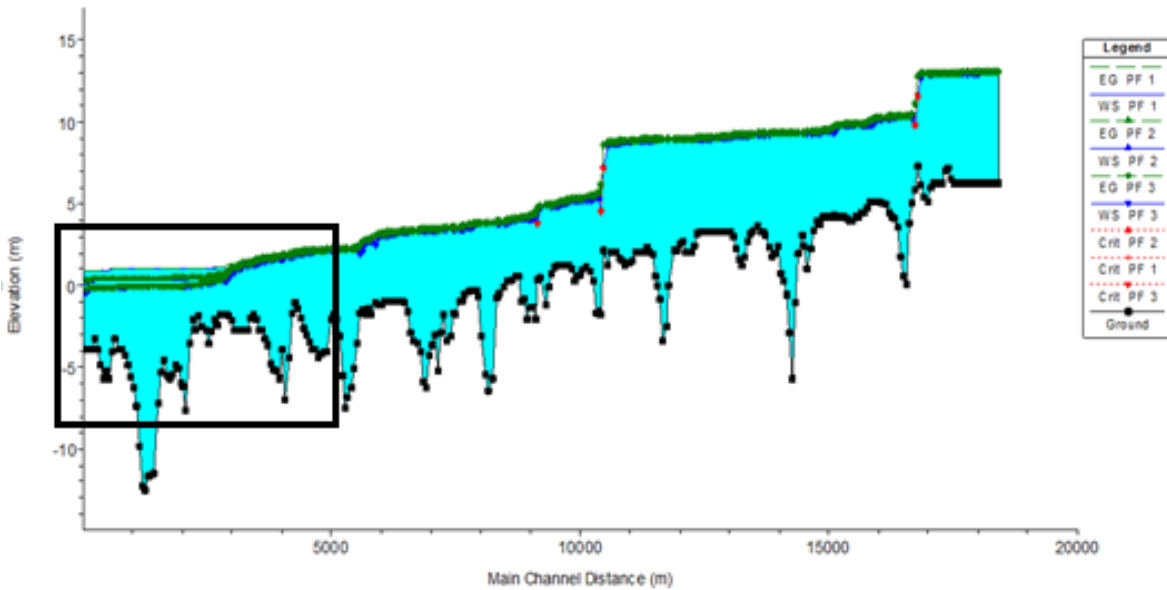
**Figura 4:** Predicción de marea durante el 10 al 13 de julio del 2006.

Para el análisis de sensibilidad de la respuesta hidráulica del río ante la variación de marea, se extraen del software los posibles escenarios a utilizar como condición de salida del modelo, a partir de los datos de la figura 4. El rango de marea para este caso resultó ser de 1.44 metros.

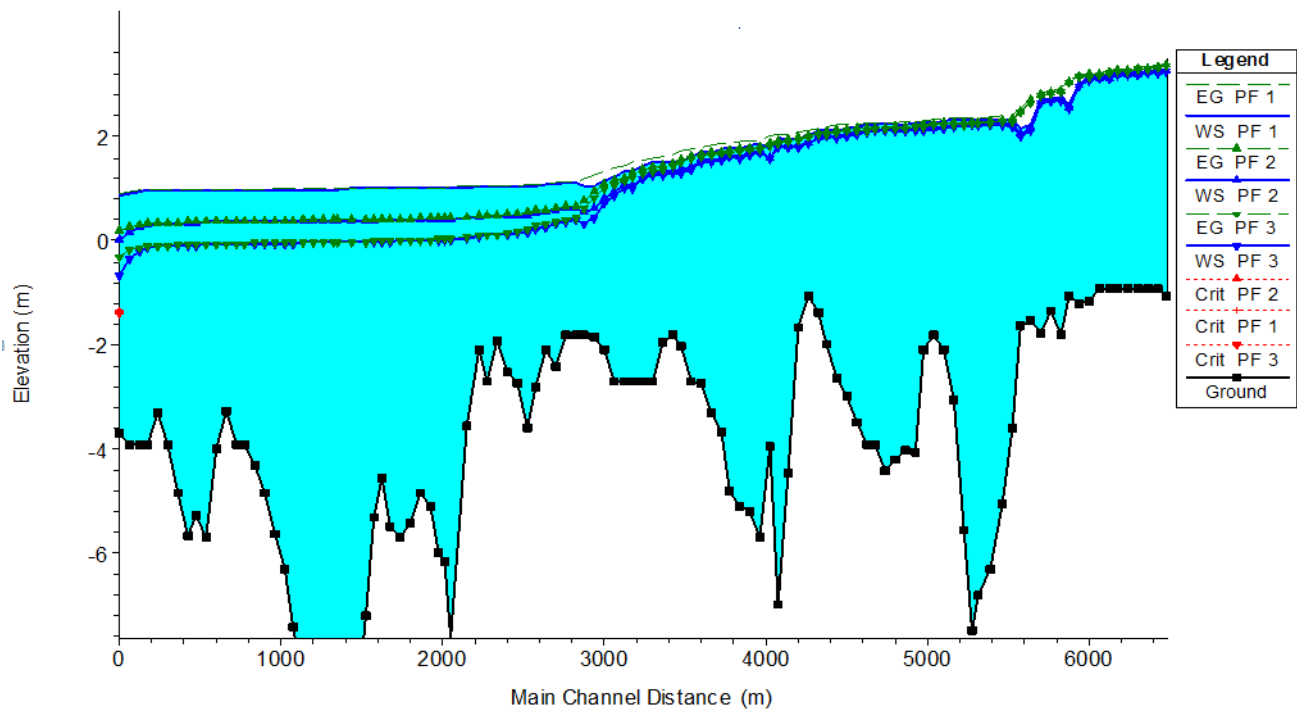
**Tabla 2:** Condiciones de borde aguas abajo utilizados en análisis de sensibilidad de marea.

Escenario	Altura marea en salida (m)
1	0.86
2	0
3	-0.66

Las figuras 5 y 6 muestran los resultados del análisis de sensibilidad realizado, mediante la vista de los tres escenarios en un perfil hidráulico longitudinal



**Figura 5:** Vista longitudinal del perfil hidráulico en el zona de estudio para los 3 escenarios de marea considerados.



**Figura 6:** Vista ampliada del perfil hidráulico en zona de influencia de mareas para los 3 escenarios considerados.

Se observa de las figuras anteriores que la variación del nivel de marea entre los valores extremos en la zona de la desembocadura resulta ser de una magnitud de altura de agua aproximada de 1 m.

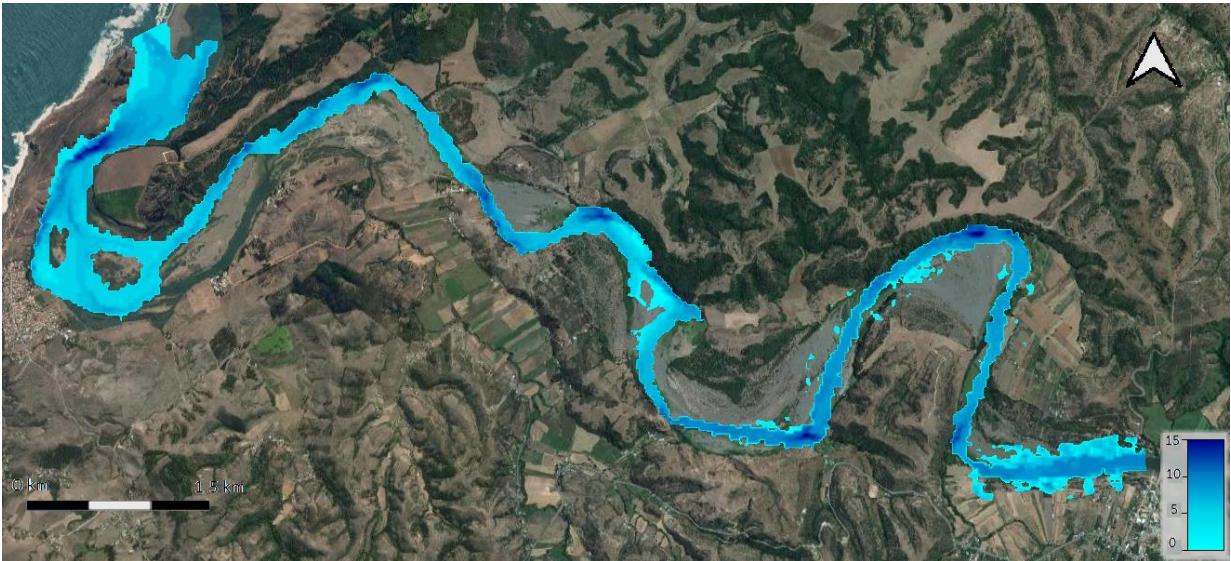
Además, se observa que la influencia de la marea abarca una zona hasta unos 2.8 km aproximadamente aguas arriba desde la desembocadura, en el cauce modelado. Esta zona se representa de manera gráfica en la figura 7.



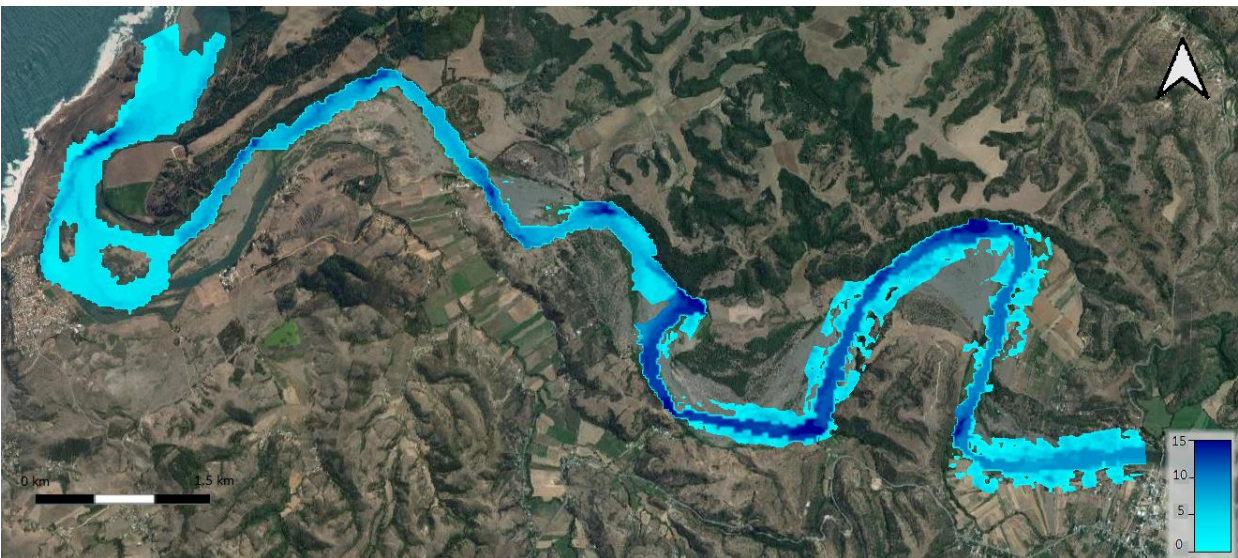
**Figura 7:** Zona de influencia de la marea delimitada por línea blanca.

### 3.3 Modelo unidimensional

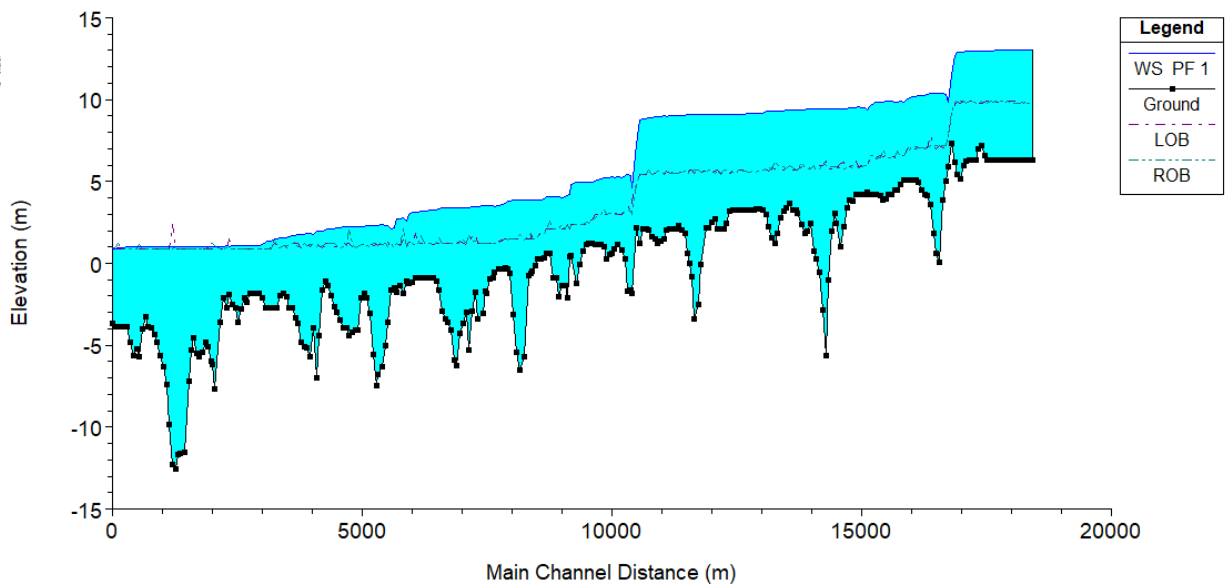
Se presentan a continuación los resultados de los modelos unidimensionales contrastados con una imagen satelital de la zona, además de los perfiles hidráulicos para cada caso.



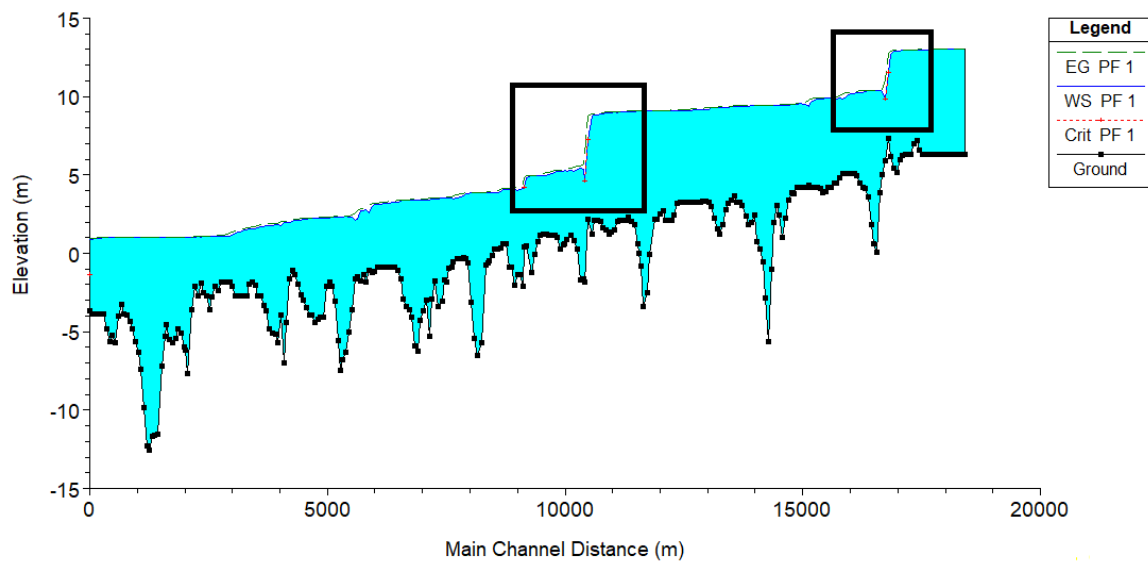
**Figura 8:** Profundidades obtenidas en modelo unidimensional estacionario para el caudal de la máxima crecida registrada el año 2006.



**Figura 9:** Profundidades máximas obtenidas en modelo unidimensional estacionario para el caudal de la máxima crecida registrada el año 2006.



**Figura 10:** Perfil hidráulico modelo unidimensional caso estacionario.



**Figura 11:** Perfil hidráulico modelo unidimensional caso no estacionario.

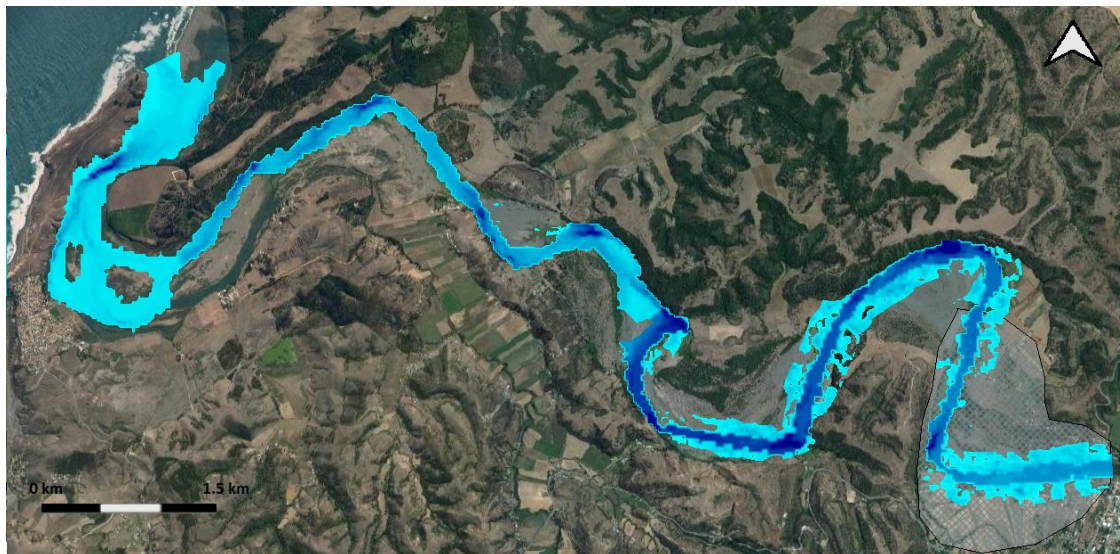
Se aprecia un notorio desborde del cauce en el punto aguas abajo del puente Rapel, donde se ubica la localidad de Rapel de Navidad. Si bien se pueden identificar otras zonas de desborde, éstas no muestran zonas pobladas inundadas. Consecuentemente, la zona a modelar bidimensionalmente sería aguas abajo del puente Rapel. Esta decisión se ve reforzada por la presencia de una fuerte curvatura en el río (i.e. casi de  $90^\circ$ ) que implica que la transferencia de cantidad de movimiento debe estudiarse en ambas direcciones horizontales, lo cual es posible sólo a través de un modelo bidimensional. El efecto de esta curvatura se señala además en la figura 11.

Estas zonas en donde se presenta un fuerte cambio en la pendiente de superficie de agua, se observan en los perfiles hidráulicos obtenidos. En el caso no estacionario, se observan desbordes mucho mayores, o que abarcan mayores áreas, que lo obtenido en el modelo no estacionario. El nivel de ribera se muestra en la figura 10. En cuanto a la superficie de agua obtenida, se alcanzan diferencias de hasta 1.2 metros.

**Tabla 3:** Comparación resultados modelos unidimensionales.

	Altura máx. de agua sobre ribera (m)	Área cubierta por flujo ( $\text{km}^2$ )
Estacionario	3.627	44.058
No estacionario	4.823	47.548

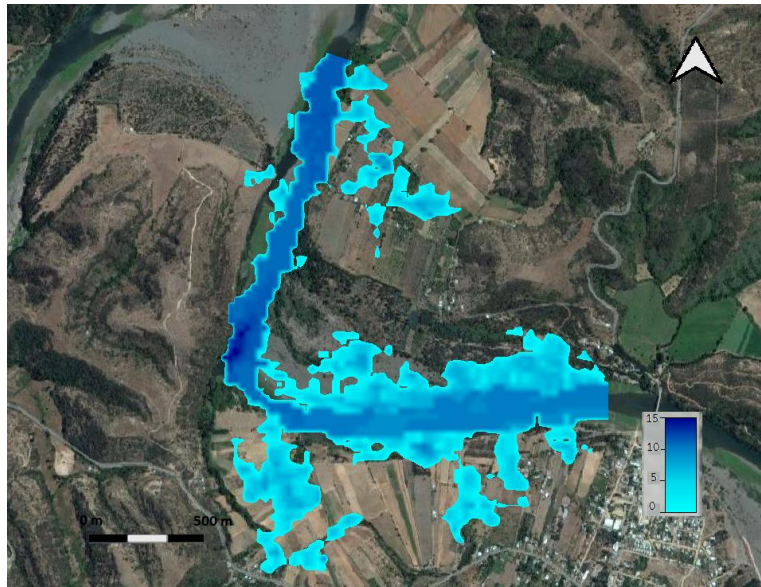
Observando y comparando ambos casos, coincide la inundación en la zona aguas abajo del puente Rapel, marcado por el cuadro en la figura 9, por lo que a partir de ambos resultados, se determina que la zona a modelar bidimensionalmente es la ubicada justo aguas abajo del puente Rapel, cercana a Rapel de Navidad (Figura 12). Esta zona cubre un área de  $4.244 \text{ km}^2$ .



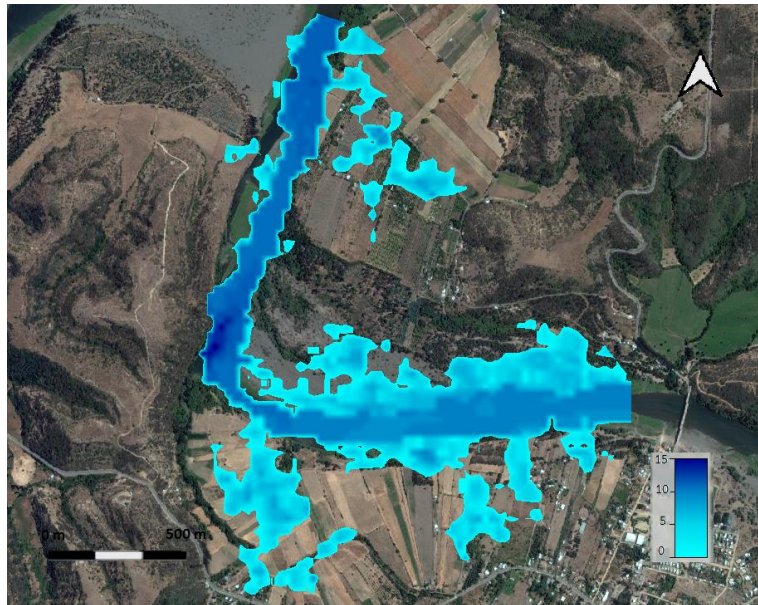
**Figura 12:** Zona modelación bidimensional.

### 3.4 Modelo Bidimensional

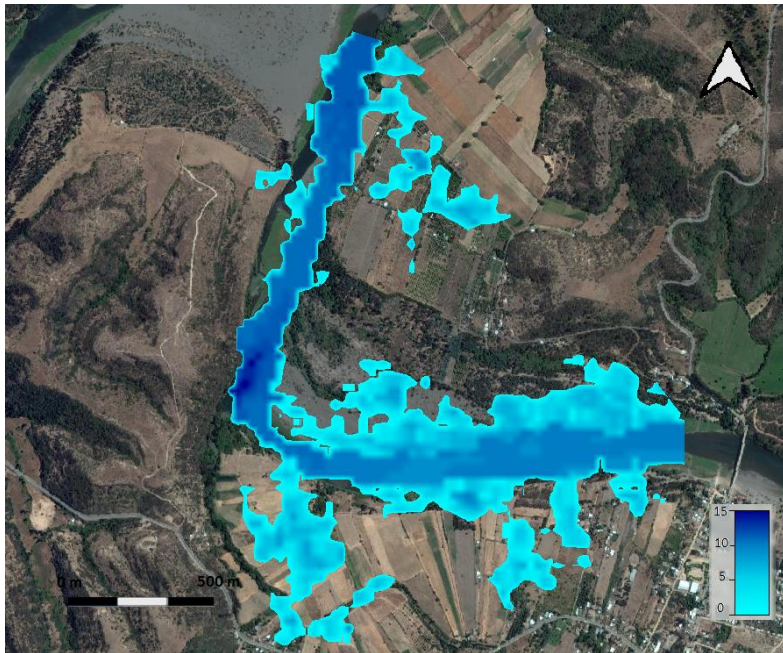
A continuación se presentan las zonas de inundación con modelación bidimensional considerando distintos tamaños de celdas, graficadas en base a las profundidades obtenidas, para un caudal de  $619.21 \text{ m}^3/\text{s}$ .



**Figura 13:** Modelación 2D utilizando celdas 6x6 metros.



**Figura 14:** Modelación 2D utilizando celdas 5x5 metros.



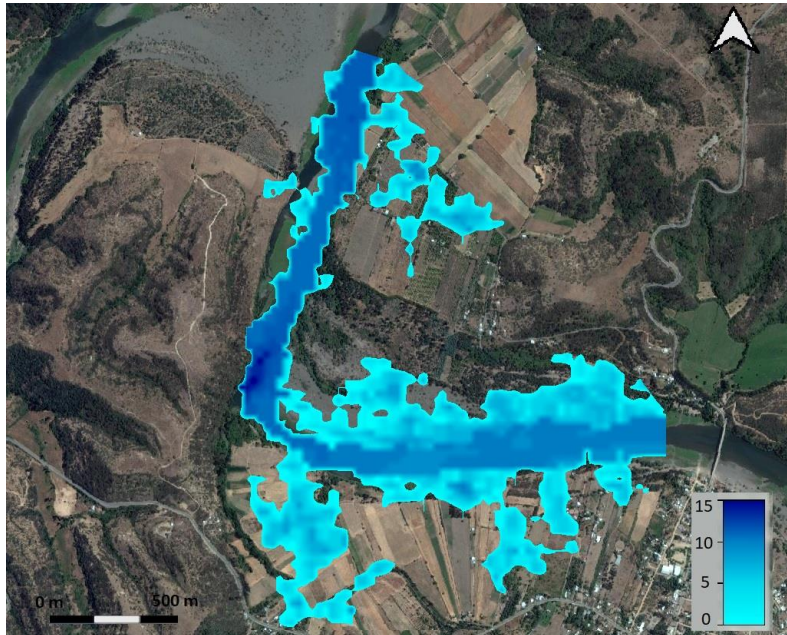
**Figura 15:** Modelación 2D utilizando celdas 4x4 metros.

Es posible apreciar de las figuras 13, 14, 15, y de la tabla 4, las diferencias en cuanto a las zonas inundadas mostradas en cada caso. El caso del modelo con celdas de 4x4 metros es el que abarca mayor área inundada. Si bien las diferencias podrían no ser tan notorias o considerables, para estudios en los que se está cuantificando un riesgo para la población, es necesario considerar el caso más preciso. En cuanto a las profundidades obtenidas, las diferencias alcanzan valores de hasta 1.6 metros, siendo el caso con mayores profundidades el modelo con celdas de 4x4 metros. Celdas de menor tamaño no arrojaron diferencias respecto al anterior, por lo que se concluye que celdas de 4x4 son adecuadas para la modelación.

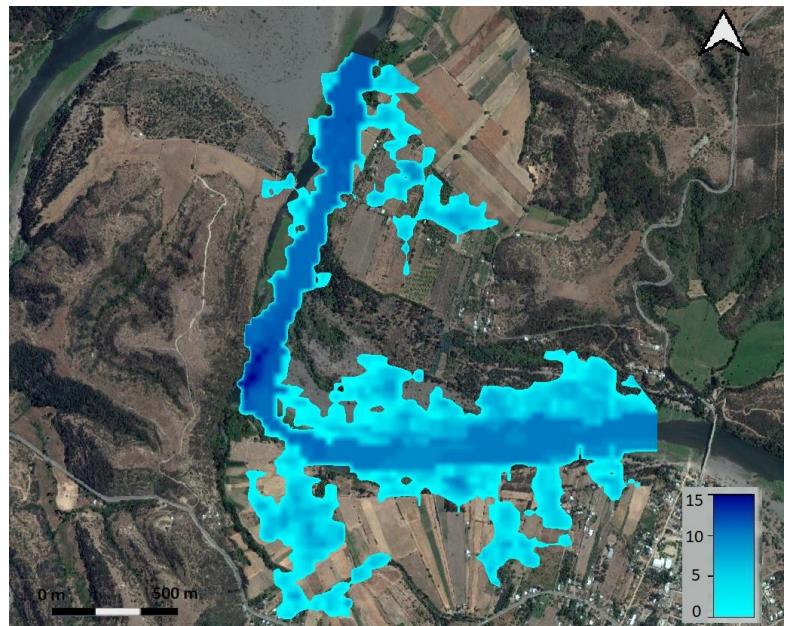
**Tabla 4:** Resultados análisis de sensibilidad tamaños de celda.

Tamaño de celda (m)	Área total inundada (km <sup>2</sup> )	Profundidad máxima sobre planicies (m)
4x4	1.44	6.674
5x5	1.42	6.534
6x6	1.34	6.648

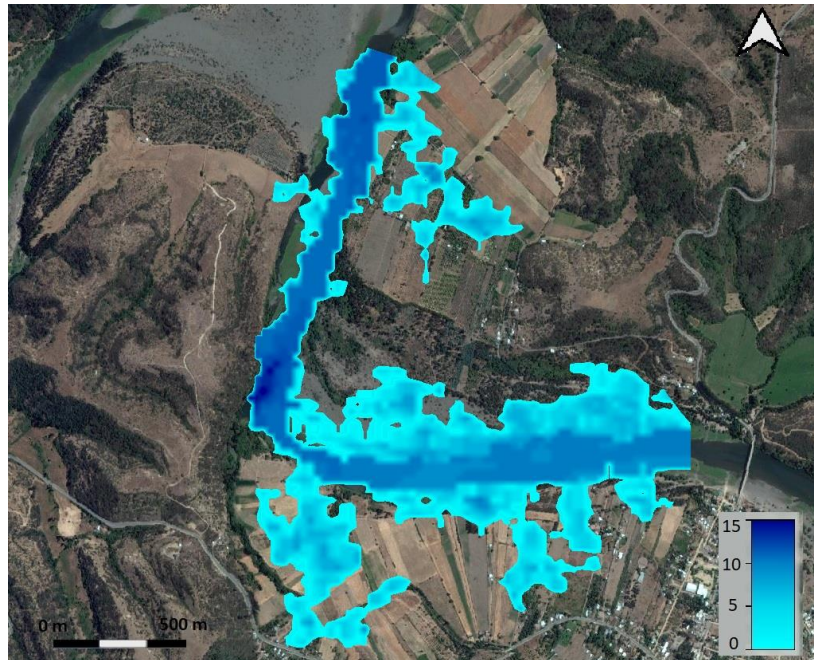
A continuación se muestran los resultados obtenidos de la modelación bidimensional del área escogida, para los caudales asociados a distintos periodos de retorno.



**Figura 16.** Modelo bidimensional para caudal de 10 años de retorno.



**Figura 17.** Modelo bidimensional para caudal de 50 años de retorno.



**Figura 18.** Modelo bidimensional para caudal de 100 años de retorno.

**Tabla 5:** Resultados modelación bidimensional.

Periodo de retorno T(años)	Área inundada (km <sup>2</sup> )	Velocidad máxima en planicies (m/s)	Profundidad máxima sobre planicies (m)
10	1.485	4.65	3.96
50	1.513	5.046	4.13
100	1.637	5.834	5.67

Si se comparan los resultados de la tabla 5 en la que se modeló con un caudal de 701 m<sup>3</sup>/s con el resultado de la tabla 3, en donde el caudal peak utilizado fue de 619.21 m<sup>3</sup>/s, la diferencia en áreas alcanzan un 13%.



**Figura 19:** Distribución de velocidades de crecida de 10 años de periodo de retorno.

En cuanto a las velocidades, en los tres casos alcanzaron valores similares, con máximos de hasta 6 m/s.

La zona inundada no afecta directamente al poblado, pero sí los terrenos y viviendas aledañas. En estas se alcanzan alturas de agua de hasta 5 metros. Esto podría significar que frente a una emergencia de este tipo, los habitantes de esta zona debieran evacuar hacia zonas más seguras, principalmente la más cercana al meandro aguas abajo del puente Rapel. En la Figura 20, se delimitan las zonas con mayor riesgo frente a una eventual crecida junto con la ubicación de viviendas dentro de ella, en base a los resultados obtenidos anteriormente. Además, se señala un tramo de la Ruta G-880, la cual conecta Rapel de Navidad con las demás localidades y que podría ser parcialmente bloqueada por el avance del desborde.



**Figura 20.** Potenciales zonas de inundación

#### **4. DISCUSIÓN Y CONCLUSIONES**

La metodología aplicada resulta eficiente en términos de tiempo pues al requerirse la realización de mapas de inundación en áreas de estudio de tamaño considerable, no se hace necesario modelar bidimensionalmente la totalidad de las planicies de inundación a lo largo del río, sino que a partir de una modelación unidimensional del cauce principal, se pueden determinar las zonas en las que se produzcan desbordes y sea necesaria la generación de una malla 2D. De esta manera, el tiempo necesario para realizar simulaciones puede reducirse y optimizarse considerablemente.

La variación en el nivel de marea durante el periodo considerado en la simulación, no puso en riesgo a la población establecida. Si bien en la localidad de La Boca no se produjo un desborde considerable del cauce, la diferencia entre los valores máximos y mínimos no arrojó un resultado que implicara una inundación en la modelación de esa zona pues ésta se ubica en cotas mayores a los 10 metros sobre el nivel del mar, y tampoco tuvo influencia hacia aguas arriba, como se observó en la figura 5.

De la modelación unidimensional, considerando caso estacionario y no estacionario, se identifica como zona de mayor inundación toda el área previa al angostamiento en el río. Además en este punto, se produce un cambio en la dirección del cauce con un ángulo de curvatura cercano a  $90^\circ$ , lo que sumado al angostamiento en el cauce del río en esa zona, causa que la crecida comience a peraltarse aguas arriba como se observó en los perfiles hidráulicos de las figuras 10 y 11. De esta manera el flujo comienza a dispersarse lateralmente para luego desbordarse del cauce principal, explicándose así la inundación en las zonas aledañas al cauce en ese punto. Otra consecuencia de esta situación es la reducción del efecto de la crecida aguas abajo de este punto de angostamiento, evitando así que se produzcan desbordes considerables en las localidades aguas abajo.

Como se observó en el modelo bidimensional y en base a lo anterior, la zona más propensa a ser inundada es el área poblada inmediatamente aguas debajo de Rapel de Navidad, siendo una de las que cuenta con mayor población en la zona. Además, si en el futuro se quisiera expandir la urbe, se deberá considerar el construir defensas que aumenten la seguridad en la zona de mayor riesgo, o bien realizar dragados en la zona de meandro y angostamiento, con el fin de reducir la acumulación de agua en esos puntos.

Dado que los datos de terreno no contemplan la localidad de Rapel de Navidad en sí, este estudio resulta útil para ser utilizado como una primera aproximación a la definición de zonas de riesgo de inundación.

## 5. REFERENCIAS

**Balboltín J.** (2013). “Modelación de la sedimentación en el Embalse Rapel: delta y corriente de turbidez”

**Barnes, H.** (1967). *Roughness Characteristics of Natural Channels*. Washington: U.S. Geological survey water supply paper.

**Brunner, Gary W.** (2014) Combined 1D and 2D Modeling with HEC-RAS Hydrology Engineering Center (HEC).

**Chu, H; Lin, Y; Huang, C; Hsu, C. & Chen, H.** (2010) “Modelling the hydrologic effects of dynamic landuse change using a distributed hydrologic model and a spatial land-use allocation model”. Hydrological Processes, 2010, Vol. 24.

**de la Fuente, A.** (2003) “Modelación Hidrodinámica del Sistema Ambiental del Embalse Rapel”.

**DGA** (2004). “Diagnóstico y Clasificación de los Cursos y Cuerpos de Agua según Objetivos de Calidad, Cuenca del Río Rapel”. Ministerio de Obras Públicas

**Ferraz,F** (1996) “Análisis de la oferta y demanda de recursos hídricos en cuencas críticas de Loa, Rapel y Mataquito”

**McDonald, R., Nelson, J., Bennett, J** (2005). “ *Multi-Dimensional Surface-Water Modeling System User's Guide: U.S. Geological Survey Techniques and Methods*”

**ONEMI** (2008). “Diagnóstico Zonas Vulnerables por Crecidos de Embalses”. Dirección Regional del Libertador Bernardo O'Higgins.