

## CARACTERIZACIÓN Y PREDICCIÓN DE LA TEMPERATURA DEL AGUA EN EL RÍO URUGUAY: MODELADO NUMÉRICO E IMPLICACIONES ECOLÓGICAS EN EL SEGMENTO CONCEPCIÓN DEL URUGUAY-NUEVA PALMIRA

### CHARACTERIZATION AND PREDICTION OF WATER TEMPERATURE IN THE URUGUAY RIVER: NUMERICAL MODEL AND ECOLOGICAL IMPLICATION IN THE CONCEPCION DEL URUGUAY – NUEVA PALMIRA REACH

Lucas E. Palman<sup>a,b</sup>, Lucas Dominguez Ruben<sup>a,b</sup>, Martin Sabarots Gerbec<sup>c</sup>, Sofia Acosta<sup>a,b</sup>, Celeste Toledo<sup>a,b</sup>, Mauricio Monserrat<sup>a,b</sup>, Andres Angeloni<sup>a,b</sup>

<sup>a</sup>Universidad Nacional del Litoral, Facultad de Ingeniería y Ciencias Hídricas. Santa Fe, Argentina, [lucaspalman@gmail.ar](mailto:lucaspalman@gmail.ar),

<sup>b</sup>Centro de Estudios Hidro-Ambientales del Litoral. Santa Fe, Argentina,

<sup>c</sup>Instituto Nacional del Agua,

**Palabras clave:** Simulación Temperatura de agua, openTELEMAC-Mascaret, Río Uruguay.

**Resumen.** Se implementó el modelo numérico bidimensional OpenTelemac-Mascaret para simular el transporte térmico y su intercambio con el ambiente en un tramo de 182 km del río Uruguay, entre Concepción del Uruguay y Nueva Palmira. El modelo fue calibrado y validado con datos de campo, mostrando buena concordancia entre temperaturas simuladas y observadas. Los resultados permitieron caracterizar el régimen térmico del río y evaluar escenarios con temperaturas extremas, constituyendo una herramienta útil para predecir alteraciones térmicas y apoyar la gestión ambiental

**Keywords:** Temperature water simulation, openTELEMAC-Mascaret, Uruguay River.

**Abstract.** The OpenTelemac-Mascaret numerical model was implemented to simulate thermal transport and its interaction with the environment along a 182 km reach of the Uruguay River, between Concepción del Uruguay and Nueva Palmira. The model was calibrated and validated using field data, showing good agreement between simulated and observed temperatures. The results allowed for the characterization of the river's thermal regime and the evaluation of extreme temperature scenarios, making it a useful tool for predicting thermal alterations and supporting environmental management.

## 1 INTRODUCCIÓN

La temperatura que se desarrolla en los cauces es un parámetro influyente en la dinámica biológica de las especies existentes (Hannah and Garner, 2015), controlando tanto la dinámica del ecosistema (Dugdale *et al.*, 2016) como la calidad del agua (Delpla *et al.*, 2009), así como el efecto del impacto antrópico en el ambiente (Muñoz-Mas *et al.*, 2016). La temperatura del agua es resultado de un gran número de variables ambientales difíciles de estimar con alta resolución espacial, más aún cuando se trata de tramos de cauce. Si bien se han realizado esfuerzos para su medición mediante estaciones fijas o a través de sensores remotos (Dugdale *et al.*, 2016), la dinámica que se desarrolla en un cauce está dominada por la variabilidad longitudinal y transversal del mismo.

Existen procesos de diferentes órdenes presentes en lo que se denomina paisaje térmico: desde procesos de nivel general como los climáticos e hidrológicos (primer orden) a escala de cuenca, hasta los bosques ribereños y la topografía (segundo orden), y a escala local, la morfología y topología del cauce (Steel *et al.*, 2017). Todos estos elementos interactúan de manera compleja y actualmente pueden ser representados a través de modelos numéricos que permiten el cálculo de la transferencia de calor y la interacción con el ambiente.

Dada esta complejidad de escalas y variables presentes en la heterogeneidad del ambiente, es muy difícil alcanzar buenas aproximaciones de cálculo numérico, más aún cuando se trata de tramos extensos con diferentes morfologías fluviales y variedad de anchos donde las variables climáticas podrían ejercer influencias diversas.

En este trabajo se presenta la calibración e implementación de un modelo matemático bidimensional aplicado a un tramo de 180 km del río Uruguay, comprendido entre Concepción del Uruguay y Nueva Palmira. Para la validación del modelo se utilizaron datos de temperatura obtenidos de una serie de estaciones de monitoreo ubicadas estratégicamente a lo largo del tramo de estudio, las cuales proporcionan registros puntuales de esta variable. El modelo implementado corresponde a OpenTelemac Mascaret (Hervouet, 2007), al cual se acopló el módulo de calidad de agua para la modelación de la temperatura y su interacción con las condiciones ambientales. Los resultados revelan una dinámica térmica variada, caracterizada por gradientes longitudinales relativamente bajos de 2-3 °C, particularmente durante condiciones hidrológicas extremas de estiaje, mientras que los gradientes transversales resultan aún menores (1-2 °C). No obstante, se observan cambios estacionales significativos que alcanzan diferencias del orden de 8°C en períodos de 2-3 meses, tanto en sentido longitudinal como transversal del cauce. Esta dinámica térmica influye directamente en el comportamiento ictiológico de la región y puede generar modificaciones en el hábitat de diversas especies acuáticas, aspecto de particular relevancia para la gestión integral del recurso.

## 2 METODOLOGÍA

### 2.1 Información hidrometeorológica

Se realizó un exhaustivo análisis y compilación de la información meteorológica e hidrométrica para la calibración del modelo. La Figura 1 muestra la ubicación de las estaciones en el entorno de modelación conforme el tipo de información que registran. La información meteorológica se obtuvo de cuatro fuentes -el Servicio Meteorológico Nacional (SMN-RA), Instituto Nacional de Tecnología Agropecuaria (INTA-RA), Comisión Administradora del Río Uruguay (CARU) y el Instituto Uruguayo de Meteorología (INUMET)- mientras que las estaciones hidrométricas y de temperatura corresponden a la CARU. Además de las estaciones indicadas, se contó con los caudales a la salida de la represa Salto Grande que fueron utilizadas

como condición de borde hidrodinámica aguas arriba. La pre-selección de las estaciones a utilizar se realizó teniendo en cuenta los siguientes factores: periodo total de registro, paso de tiempo de registro y variables necesarias para ingresar al modelo de transporte.

La CARU dispone de registros continuos de temperatura del agua en distintos puntos del río, próximos a las estaciones hidrométricas. Si bien los sensores se encuentran ubicados cerca del fondo, mediciones realizadas con equipos de calidad de agua, evidenciaron la ausencia de estratificación térmica. En consecuencia, se considera que los registros disponibles son representativos y adecuados para contrastar con los resultados del modelo 2DH.

La estación de Fray Bentos (CARU) contiene casi todas las variables involucradas en las distintas expresiones del balance de energía, a excepción de la nubosidad que fue tomada de la estación del SMN Gualeguaychú -ubicada a unos 20 km de la primera-, y que es registrada mediante el método de octas con frecuencia horaria. Por otro lado, se contó con buena información para establecer condiciones de borde tanto hidrodinámicas como para el modelo de transporte.

## 2.2 Modelo Numérico

Se empleó el paquete de cálculo openTELEMAC-Mascaret en su módulo bidimensional (TELEMAC 2D) para el cálculo de flujo a superficie libre bidimensional en el plano horizontal acoplado al módulo de calidad de agua WAQTEL (Water Quality for TELEMAC). TELEMAC2D permite tratar todos los aspectos de la hidráulica natural de superficie libre: corrientes, olas, transporte de trazadores y sedimentología mientras que WAQTEL permite el cálculo adicional de los procesos de interacción en el flujo y con el ambiente de diferentes trazadores (i.e.: oxígeno disuelto, biomasa, temperatura, etc.).

Las principales variables hidrodinámicas que se obtienen son profundidad de agua y velocidad sobre las dos componentes del plano  $(x,y)$ , mientras que, desde el punto de vista del transporte, se obtiene el valor de temperatura del agua.

TELEMAC 2D resuelve las ecuaciones de Saint Venant (1871) usando el método de elementos finitos sobre una malla triangular:

$$\frac{\partial H}{\partial t} + \vec{u} \cdot \vec{\nabla}(H) + H \operatorname{div}(\vec{u}) = S_h \quad (1)$$

$$\frac{\partial u}{\partial t} + \vec{u} \cdot \vec{\nabla}(u) = -g \frac{\partial z_s}{\partial x} + S_x + \frac{1}{H} \operatorname{div}(H v_f \vec{\nabla} u) \quad (2)$$

$$\frac{\partial v}{\partial t} + \vec{u} \cdot \vec{\nabla}(v) = -g \frac{\partial z_s}{\partial y} + S_y + \frac{1}{H} \operatorname{div}(H v_f \vec{\nabla} v) \quad (3)$$

$$\frac{\partial T}{\partial t} + \vec{u} \cdot \vec{\nabla}(T) = S_{Tr} + \frac{1}{H} \operatorname{div}(H v_T \vec{\nabla} T) \quad (4)$$

Donde:  $x, y$  (m) coordenadas globales,  $H$  (m) profundidad en el nodo,  $z_s$  (m) cota de superficie de agua (sistema de referencia arbitrario), donde  $z_s = z_b + H$ ,  $z_b$  (m) cota de fondo,  $\vec{u} = (u, v)$ , vector velocidad,  $u, v$  (m/s) componentes de velocidad,  $T$  (° C) trazador,  $g$  (m/s<sup>2</sup>) aceleración gravitatoria,  $v_f, v_T$  (m<sup>2</sup>/s) coeficiente de difusión turbulenta del flujo y trazador (respectivamente),  $t$  (s) tiempo,  $S_h$  (m/s) fuente o sumidero de fluido,  $S_x, S_y$  (m/s<sup>2</sup>) fuente o sumidero en la ecuación dinámica,  $S_{Tr}$  (g/l/s) fuente o sumidero de trazador, donde  $H, u, v$  y  $T$  son nuestras variables desconocidas.

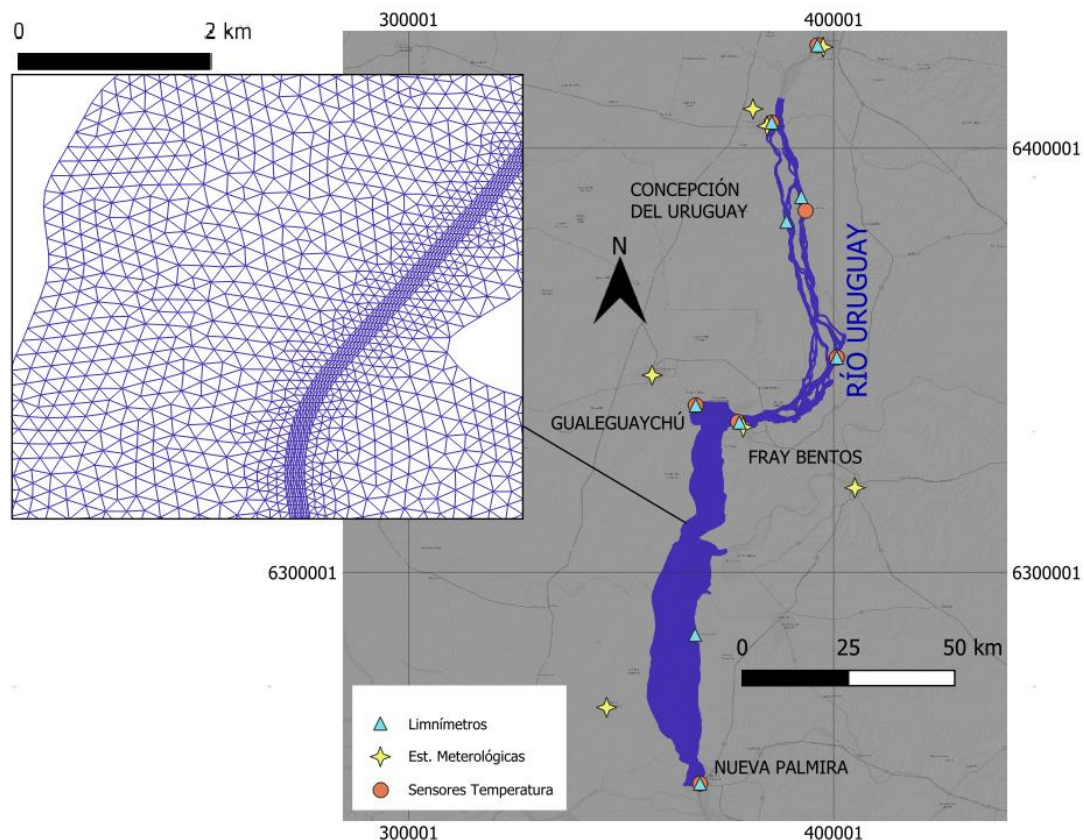


Figura 1: Entorno de modelación, ubicación de las estaciones hidrometeorológicas y detalle del mallado.

Los términos de las ecuaciones previas son calculados en uno o más pasos (en el caso del término de advección por el método de las características) de la siguiente manera:

- Advección de  $H$ ,  $u$  y  $v$ .
- Propagación, difusión y términos fuentes de la ecuación de conservación.
- Difusión y términos fuentes de la ecuación de transporte de trazadores.

En cuanto a la viscosidad turbulenta, puede ser ingresada por el usuario (viscosidad constante) o determinada a través del modelo de cierre de turbulencia  $k-\epsilon$  en donde se evalúa la generación de energía turbulenta con la disipación (Hervouet, 2007) o por el método de Smagorinski (1963). Para la representación de rugosidad de fondo se utiliza la ley de Manning, aunque es posible aplicar diferentes métodos como la ley de Haaland, Chézy, Nikuradse, entre otros.

Por otro lado, en relación al mallado, el mismo se efectuó en el software BlueKenue, con características no estructurada, con una malla de alta resolución sobre el canal central de navegación de 10m una más extensa de 20m entre Concepción del Uruguay y Fray bentos y aguas abajo de esta última de 50 m. Esto resulta en una malla de 71688 nodos y 135488 elementos triangulares con área media del orden de los 7000 m<sup>2</sup>. Para la confección del modelo digital del terreno se utilizó una batimetría provista por CARU compuesta de diversas fuentes (Junes, 2020) que fueron unificadas al plano de referencia Wharton y georeferenciadas al sistema UTM21 Sur.

### 2.3 Intercambio de calor aire-agua

WAQTEL es un módulo del sistema openTelemac-Mascaret que se centra en los aspectos de calidad del agua. Fue desarrollado para permitir a los usuarios abordar problemas de calidad del agua junto con la hidrodinámica y su intercambio con su entorno. Ambos módulos Telemac

2D y WAQTEL son implementados de manera conjunta en cada paso de cálculo.

La evolución de la temperatura del agua está estrechamente relacionada con los flujos de calor a través de la superficie libre. Estos flujos (en W/m<sup>2</sup>) son de cinco tipos:

- Radiación solar o flujo de rayos solares  $RS$ ,
- Flujo de radiación atmosférica  $RA$ ,
- Radiación del agua o flujo de radiación de la superficie libre  $RE$ ,
- Calor latente o flujo de calor debido a la advección  $CV$ ,
- Calor sensible de origen conductivo o flujo de calor debido a la evaporación  $CE$

El balance final de los términos de la fuente ( $S_{Tr}$  superficial),  $S_{surf}$ , viene dado por la Ec. ((5). En TELEMAC (WAQTEL, 2023) dicho valor se añade al término fuente de la ecuación de advección-difusión del trazador Ec. (4) y Ec. ((6).

Existen numerosas fórmulas en la literatura que permiten calcular cada término de la ecuación ((5). Generalmente, el flujo de calor neto se calcula con base en la temperatura del agua y diversos datos meteorológicos, principalmente en función de la temperatura del aire, la humedad del aire, la presión atmosférica, presión de vapor, la radiación solar de onda corta medida, precipitación y la velocidad del viento. Dichos datos son asignados a todo el dominio de cálculo, pudiendo realizar algún tipo de segmentación en el caso de contar con estaciones distribuidas.

En WAQTEL el término de  $RS$  debe ser ingresado como dato, mientras que los restantes se calculan como se sintetiza en la [Tabla 1](#):

Término de la ecuación	Ecuación	Definición de variables y parámetros
Balance superficial	$S_{surf} = RS + RA - RE - CV - CE \quad (5)$	$RS$ : Radiación solar (W/m <sup>2</sup> ); $RA$ : Radiación atmosférica (W/m <sup>2</sup> ); $RE$ : Radiación emitida por el agua (W/m <sup>2</sup> ); $CV$ : Calor sensible por advección (W/m <sup>2</sup> ); $CE$ : Calor latente por evaporación (W/m <sup>2</sup> )
Término fuente del trazador	$S_{Tr} = \frac{S_{surf}}{H\rho_w C_{pw}} \quad (6)$	$H$ : profundidad del agua (m); $\rho_w$ : densidad del agua (kg/m <sup>3</sup> ); $C_{pw}$ : calor específico del agua (J/kg°C)
Radiación atmosférica	$RA = e_{air}\sigma(T_{air} + 273,15)^4 \left(1 + k\left(\frac{c}{8}\right)^2\right) \quad (7)$	$e_{air}$ : emisividad atmosférica (pred. 0.97); $\sigma$ : constante Stefan-Boltzmann = $5.67 \times 10^{-8}$ W/m <sup>2</sup> K <sup>4</sup> ; $T_{air}$ : temperatura del aire (°C); $c$ : nubosidad (octas); $k$ : coef. nube ( $\approx 0,2$ )
Radiación emitida por el agua	$RE = e_{water}\sigma(T_{water} + 273,15)^4 \quad (8)$	$e_{water}$ : emisividad del agua (0.92–0.97); $T_{water}$ : temperatura del agua (°C)
Calor sensible (advección)	$CV = \rho_{air} C_{pair} f(V)(T_{water} - T_{air}) \quad (9)$	$\rho_{air} = 100(\text{Pa}) / (287(T_{air} + 273,15))$ (kg/m <sup>3</sup> ); $C_{pair}$ : calor específico del aire (1005 J/kg°C); $f(V) = a + bV$ ; $V$ : velocidad viento (m/s); $a, b$ : coef. empíricos ( $\approx 0,0025$ )



Calor latente (evaporación)	$CE = L(T_{water})\rho_{air}f(V)(H^{sat} - H) \quad (10)$	$L(T_{water}) = 2,500,900 - 2,365 T_{water} \text{ (J/kg);}$ $H^{sat} = \frac{0.622P_{vap}^{sat}}{P_{atm} - 0.378P_{vap}^{sat}} \text{ (kg/kg)}$ $H = \frac{0.622P_{vap}}{P_{atm} - 0.378P_{vap}} \text{ (kg/kg)}$ $P_{vap}: \text{presión parcial vapor (hPa);}$ $P_{vap}^{sat}: \text{es la presión parcial del vapor de agua en saturación}$ $P_{vap}^{sat} = 6.11 \exp\left(\frac{17.27 T_{water}}{T_{water} + 273.3}\right)$
-----------------------------	---	---

Tabla 1: Términos del balance térmico de intercambio fluido atmósfera empleados en WAQTEL

## 2.4 Escenarios de modelación y condiciones de borde

La selección de los escenarios hidrométricos para calibrar y validar el modelo, se realizó de modo tal que los caudales se encuentren acotados a valores medios, es decir, del orden de los 5400 m<sup>3</sup>/s (Junes, 2020) teniendo en cuenta el objetivo asociado a la dinámica de la fauna íctica. Cabe destacar que el modelo hidrodinámico ya se encuentra calibrado (a través del coeficiente de rugosidad) razón por la cual se pasó directamente al análisis del modelo de calidad. Se tomaron dos ventanas temporales, una primera que llamamos de evaluación y otra de implementación, más extensa que la primera (para analizar comportamientos del modelo a mediano plazo): Escenario 1: del 19-12-2020 al 31-12-2020, Escenario 2: desde el 1-11-2021 al 31-1-2022. Se emplearon las estaciones meteorológicas de la CARU que ofrecen la mayor disponibilidad de datos -con registros medios cada 15 minutos-.

Las condiciones de borde del modelo hidrodinámico para cada evento fueron los hidrogramas en la sección de aguas arriba (Concepción del Uruguay) y los niveles hidrométricos correspondientes aguas abajo (Nueva Palmira). Mientras que, para el modelo de calidad, se impusieron como condiciones de borde, las series de temperatura del agua medida en Concepción del Uruguay y Nueva Palmira.

Las forzantes meteorológicas impuestas a todos el dominio correspondieron a los datos de la estación de Fray Bentos.

## 3 RESULTADOS

### 3.1 Calibración del modelo

Los resultados de niveles del Escenario 1 (de evaluación) y medidos se presentan en la Figura 2. Se destaca que el modelo reproduce adecuadamente las variaciones de niveles para los eventos analizados. Los errores no tienen una tendencia clara, se observan valores tanto por exceso como por defecto del orden de los 20 cm.

Este mismo escenario se usó para la calibración del modelo térmico, donde se realizó un exhaustivo análisis de sensibilidad, dadas las incertidumbres propias de los parámetros, coeficientes y expresiones para determinar las diferentes componentes del balance. En una primera etapa se analizó la sensibilidad de los siguientes parámetros/coeficientes conforme lo recomendado por bibliografía específica:  $e_{air}$ ,  $e_{water}$ ,  $a$  y  $b$  de la función de viento  $f(V)$ . Se realizaron cerca de 125 simulaciones variando estos 4 parámetros a fin de determinar su impacto en los resultados utilizando como herramienta el diagrama de Taylor (Figura 3, solo se presentan 25 de todos los casos). Este diagrama permite visualizar, simultáneamente, el error cuadrático medio (ERMS) y el coeficiente de correlación (CORCOEF) entre las series medidas

y modeladas de cada estación, así como la desviación estándar (STD) de la serie medida y las simuladas.

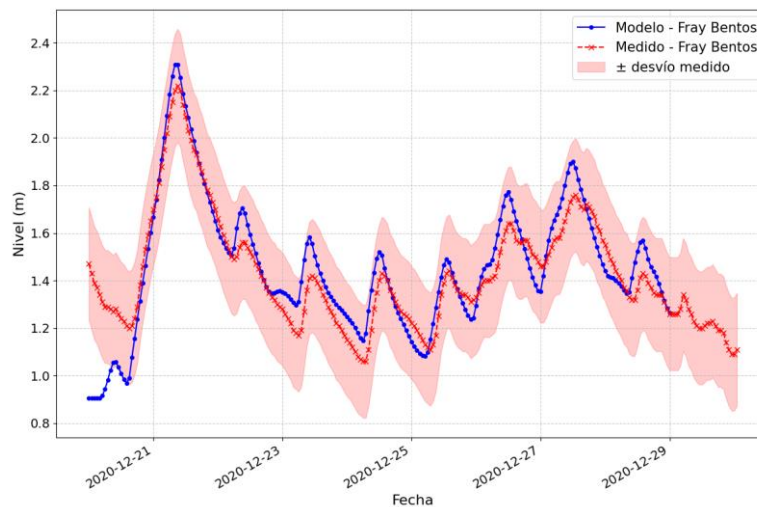


Figura 2: Comparación de niveles hidrométricos medidos y calculados en Fray Bentos. Escenario 1.

La serie contra la que se compara, esto es, la serie medida, corresponde al punto indicado como “0.0” (Ref en rojo), mientras que las series simuladas indicadas en la leyenda toman los restantes números naturales refiriendo los diferentes *test cases*. Cada test, contiene diferentes combinaciones de los cuatro parámetros analizados (ver leyenda). Mientras más cerca del punto “0.0” se encuentre el punto correspondiente a una serie simulada, mejor será el ajuste a la serie de comparación.

Cada simulación se realizó variando un solo parámetro y manteniendo constante los restantes. En la [Tabla 2](#) se resumen los rangos de variación de cada uno:

Parámetro	Min	Max
$e_{air}$	0.25	0.99
$e_{water}$	0.25	0.99
$a$	0.0005	0.01
$b$	0.0005	0.01

Tabla 2: Rango con extremos de las variables utilizadas para calibrar el modelo Escenario 1.

La mayoría de las simulaciones se agrupan entre  $CORCOEF \approx 0.7-0.95$  y desviaciones estándar entre 1.0 y 3.0 veces la observada. Indica que casi todas las combinaciones de parámetros reproducen tanto la forma como la variabilidad de la serie medida. La [Figura 4](#) presenta las series temporales de temperatura en dos puntos intermedios del modelo (Fray Bentos y Boca Gualaguaychú), donde los parámetros seleccionados fueron:  $e_{air}=0.77$ ,  $e_{water}=0.99$ ,  $a=0.0025$  y  $b=0.001$ . Es importante señalar que, de los parámetros analizados, el coeficiente de emisividad atmosférica (Ec. 7) es el que introduce mayor incertidumbre en el cálculo. Si bien la selección final de estos valores se determinó inicialmente mediante análisis estadístico, los resultados fueron posteriormente validados con información satelital, lo que permitió confirmar su idoneidad.

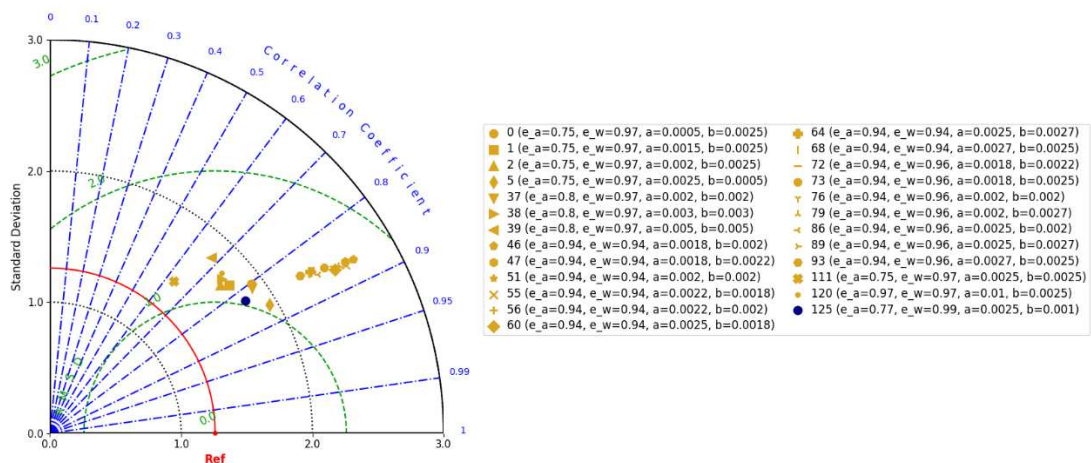


Figura 3: Diagrama de Taylor de los diferentes casos simulados modificando los 4 parámetros de calibración térmica. Evaluados en Fray Bentos.

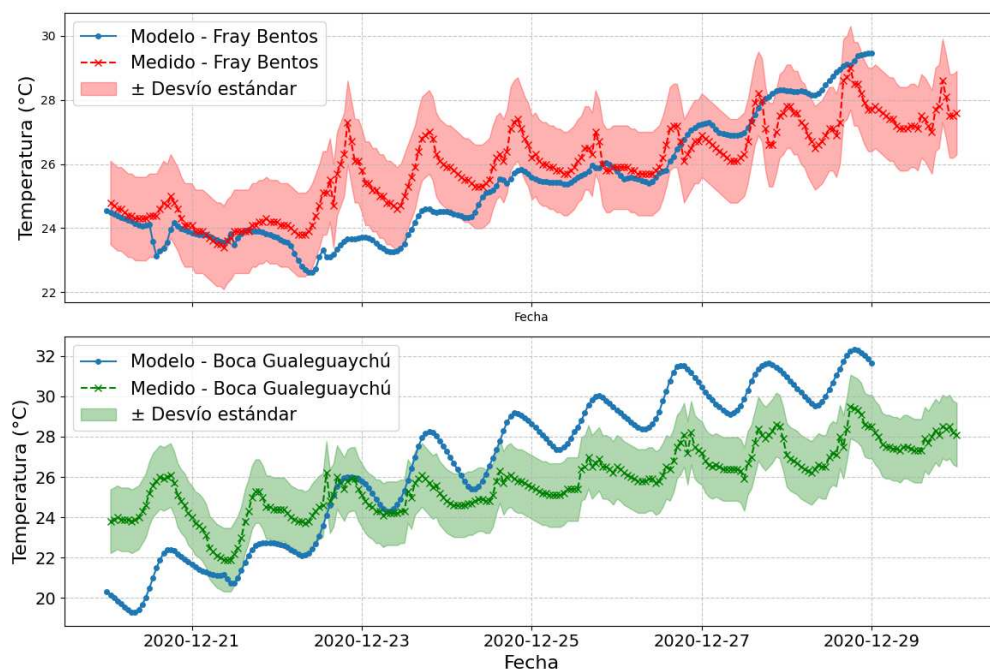


Figura 4: Temperaturas medidas y calculadas para ambos puntos de control dentro del dominio Fray Bentos y Boca Gualeguaychú. Escenario 1: diciembre 2020.

### 3.2 Validación del modelo de calidad

Adoptando los parámetros de la etapa de calibración (para  $a$ ,  $b$ ,  $e_{air}$  y  $e_{water}$ ), se realizaron las simulaciones para el período de 3 meses (Escenario 2). La Figura 5 muestra los resultados modelados y medidos en la estación Boca del Gualeguaychú (BG). Nuevamente, se aprecia buena coincidencia en las fases y en la tendencia general, pero con diferencias de magnitud casi siempre por defecto. Por otro lado, en términos medios, los estadísticos de toda la serie muestran valores de RMSE del orden de 2.33 °C, MAE 2.05 °C, bias 1.88 °C y R2 de 0.72. Esto resulta en un modelo aceptable para un modelo de temperatura bidimensional comparado con los datos medidos.

Las Figura 6 y Figura 7 presentan la variabilidad térmica del modelo Escenario 2 a lo largo



y ancho del curso de agua. Los resultados no muestran gradientes o tendencias longitudinales y transversales marcadas. En cambio, se detectan cambios estacionales pronunciados tanto en dirección longitudinal como transversal del cauce. Particularmente, no se observan grandes variaciones térmicas en Concepción del Uruguay, lo cual puede atribuirse al condicionamiento del modelo en este punto (de manera similar a lo que ocurre en Nueva Palmira). Es destacable el gradiente térmico temporal observado, con una variación de 8°C entre noviembre de 2021 y fines de enero de 2022, patrón que se evidencia consistentemente en ambas figuras.

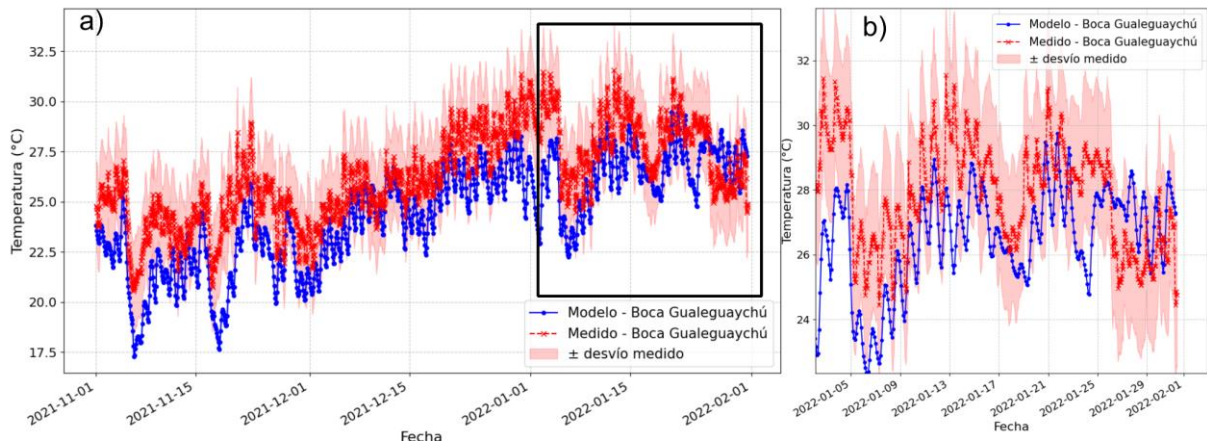


Figura 5: Temperaturas medidas y calculadas, en la estación Boca de Gualeguaychú. a) todo el periodo y b) un zoom del último tramo modelado. Escenario 2.

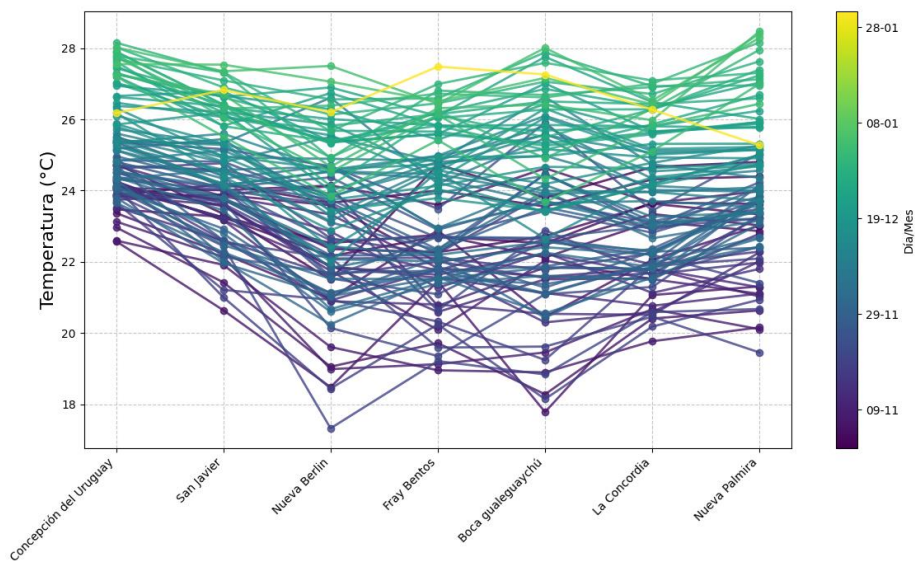


Figura 6: Variabilidad longitudinal de temperatura del Escenario 2 a lo largo del cauce.

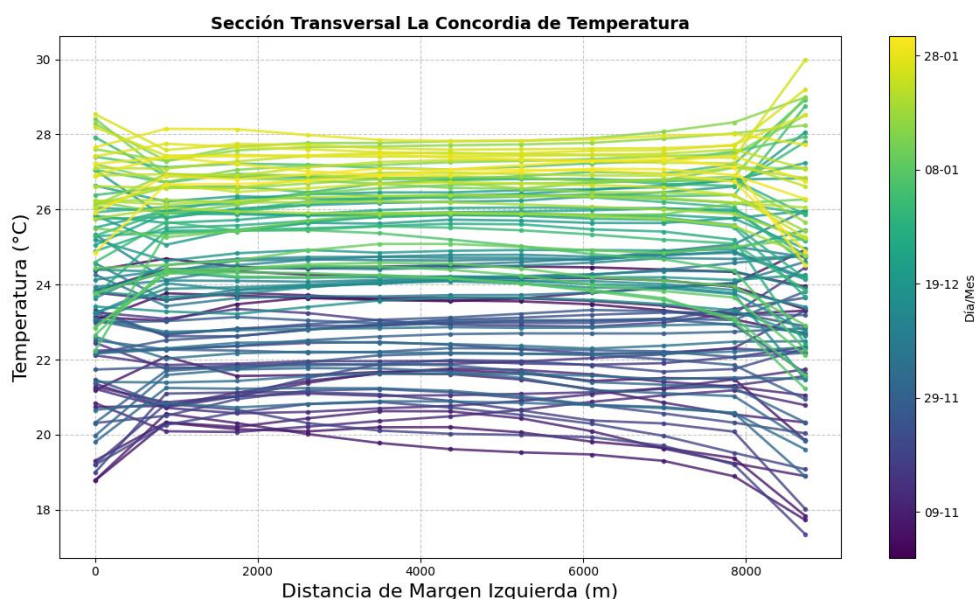


Figura 7: Variabilidad térmica en el ancho sobre el tramo inferior (La Concordia) para el Escenario 2

#### 4 DISCUSION Y CONCLUSION

En el presente trabajo se evaluó la implementación de un modelo de calidad de agua para simular la hidrodinámica y los procesos térmicos en un tramo de 180 km a lo largo de la porción media e inferior del río Uruguay. El principal desafío del modelo radica en los parámetros de calibración térmica, particularmente el coeficiente de emisividad atmosférica y la incorporación en WAQTEL de variables de nubosidad en la expresión de radiación de onda larga atmosférica. En este experimento se detectó que el término de radiación de onda larga atmosférica (Ec. 7), según la formulación de openTelemac, introduce la nubosidad como parámetro. Si bien este término no representa la mayor magnitud energética total (la radiación de onda corta solar es mucho mayor), su alta variabilidad espacial, derivada de las características heterogéneas de la nubosidad, introduce una significativa incertidumbre regional en el modelo. Esta incertidumbre se acentúa particularmente en una extensión geográfica como la del área de estudio. Al utilizar los valores recomendados por WAQTEL para el coeficiente de emisividad (0.9-0.93), se produce sistemáticamente un sobrecalentamiento del agua. Esta problemática evidencia las limitaciones de aplicar valores bibliográficos generales a contextos regionales específicos con alta variabilidad meteorológica. Es necesario destacar que este parámetro puede ser estimado mediante formulaciones alternativas que no consideren directamente la interacción con la nubosidad (Kalinowski, 2019).

La incorporación de estas metodologías alternativas en el cálculo podría reducir los errores asociados a la variabilidad espacial y mejorar significativamente los resultados del modelo.

Aunque el modelo aún presenta algunos sesgos, particularmente para el tramo modelado (del orden de  $RMSE = 2$ ), sus resultados son únicos, ya que muestran el comportamiento extendido y contrastado con datos de campo de una variable altamente dinámica. Aun así, se capturaron procesos en escalas temporales como el calentamiento estacional del agua, que alcanza casi los  $8^{\circ}\text{C}$  entre noviembre y enero (2021-2022), particularmente bajo condiciones hidrológicas de aguas muy bajas. Se requieren mayores investigaciones con el fin de evitar la incorporación de coeficientes de calibración (como la emisividad atmosférica  $e_{air}$ ) y suplirlos con formulaciones basadas en variables meteorológicas. Entre las apuestas futuras, se deberá estudiar el

comportamiento del modelo introduciendo datos meteorológicos sectorizados (mejor representación de nubosidad) para períodos más largos que tengan en cuenta la estacionalidad meteorológica como hidrológica, así como la variabilidad espacial de las forzantes meteorológicas.

## 5 REFERENCIAS

- Brunt, D. Notes on radiation in the atmosphere. I. *Q J R Meteorol. Soc.*, 58:389–420, 1932. <https://doi.org/10.1002/qj.49705824704>
- Brutsaert, W. On a derivable formula for long-wave radiation from clear skies. *Water Resour Res.*, 11:742–744, 1975. <https://doi.org/10.1029/WR011i005p00742>
- Delpla, I., Jung, A.V., Baures, E., Clement, M., Thomas, O., 2009. Impacts of climate change on surface water quality in relation to drinking water production. *Environ. Int.* 35, 1225–1233
- Dugdale, S.J., Franssen, J., Corey, E., Bergeron, N.E., Lapointe, M., Cunjak, R.A. Main stem movement of Atlantic salmon parr in response to high river temperature. *Ecol. Freshw. Fish* 25, 429–445, 2016. <https://doi.org/10.1029/WR011i005p00742>
- Hannah, D.M., Garner, G. River water temperature in the United Kingdom: changes over the 20th century and possible changes over the 21st century. *Prog. Phys. Geogr.* 39, 68–92, 2015.
- Hervouet, J. M., *Hydrodynamics of free surface flows*. John Wiley and Sons, Ltd, Electricite de France (EDF), France, 2007.
- Junes, R. *Modelo hidrodinámico del río Uruguay Determinación de los principales patrones de flujo y su variación espacio-temporal en función de los forzantes*. Msc. Tesis, Facultad de Ingeniería, Universidad de la República, Uruguay, 2020.
- Kalinowska, M. Effect of water–air heat transfer on the spread of thermal pollution in rivers. *Acta Geophysica*, 67:597–619, 2019. <https://doi.org/10.1007/s11600-019-00252-y>
- Muñoz-Mas, R., Lopez-Nicolas, A., Martínez-Capel, F., Pulido-Velazquez, M. Shifts in the suitable habitat available for brown trout (*Salmo trutta* L.) under short-term climate change scenarios. *Sci. Total Environ.*, 544, 686–700, 2016.
- Satterlund, D.R. An improved equation for estimating long-wave radiation from the atmosphere. *Water Resource Res.*, 15:1649–1650, 1979. <https://doi.org/10.1029/WR015i006p01649>
- Smagorinsky J. General circulation experiments with the primitive equations. *Mon Weather Rev.*, 1963;91:99-165, 1963.
- Steel, E.A., Beechie, T.J., Torgersen, C.E., Fullerton, A.H. Envisioning, quantifying, and managing thermal regimes on river networks. *Bioscience* 67, 506–522, 2017.
- Swinbank, WC. Long-wave radiation from clear skies. *Q J R Meteorol Soc* 89:339–348, 1963. <https://doi.org/10.1002/qj.49708938105>.
- WAQTEL, User Manual, Version v8p5. 2023.