

INFORME PARCIAL

MODELO HIDRODINÁMICO DEL RÍO PARAGUAY

Tramo comprendido entre Porto Murtinho (BR) y Pilar (PY)

Ing. Benito Pereira, M.Sc.

Proyecto: *Desarrollo e Implementación de un Sistema de Pronóstico de Niveles y Caudales del Río Paraguay*

Institución: *Universidad Católica Nuestra Señora de la Asunción*

Ente Financiado: *Consejo Nacional de Ciencias y Tecnología (CONACYT)*

Año 2018

CONTENIDO

1.	GENERALIDADES.....	1
1.1	Software de Modelación Numérica	1
1.2	Esquema de Modelación	2
2.	RELEVAMIENTO Y SISTEMATIZACIÓN DE LA INFORMACIÓN	3
2.1	Datos de Topografía	3
2.1.1	Batimetría.....	3
2.1.2	Topografía de las Planicies de Inundación	4
2.1.3	Construcción del Modelo Digital de Elevación (MDE).....	5
2.2	Datos de Niveles Observados.....	7
2.3	Datos de Caudal	8
3.	MODELO HIDRODINÁMICO.....	10
3.1	Geometría	10
3.1.1	Espaciamiento entre secciones transversales.....	10
3.1.2	Valores de Rugosidad de Manning.....	13
3.2	Calibración.....	15
3.2.1	Generalidades	15
3.2.2	Evaluación de Desempeño del Modelo.....	16
3.3	Validación.....	21
4.	CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES.....	24
	REFERENCIAS.....	26

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 Esquema conceptual de modelación del Río Paraguay	2
Figura 2 Zonas del Río Paraguay con información batimétrica	3
Figura 3 Ejemplo de datos batimétricos utilizados	4
Figura 4 Planicie de Inundación del Río Amazonas. Fuente: (Yamazaki, et. al., 2017).	5
Figura 5 Configuración de la geomorfología del Río Paraguay.	5
Figura 6 Tramo del Río Paraguay en Planta con cauce incorporado (MDE: MERIT SRTM).....	6
Figura 7 Tramo del Río Paraguay en perspectiva con cauce incorporado (MDE: MERIT SRTM) ..	6
Figura 8 Datos de Niveles Observados. Periodo: 2006 – 2018	7
Figura 9 Correlación entre niveles registrados en Asunción y Villeta.....	7
Figura 10 Correlación entre niveles registrados en Puerto Rosario y Concepción.....	8
Figura 11 Correlación entre niveles registrados en Alberdi y Pilar	8
Figura 12 Curva Altura-Caudal en Puerto Murtiño	8
Figura 13 Serie de Caudal en Puerto Murtiño (Periodo: 1939 – 2018).....	9
Figura 14 Secciones transversales trazadas sobre el MDE (líneas verdes)	11
Figura 15 Perfil Longitudinal del Río Paraguay en el entorno HEC-RAS.....	12
Figura 16 Trechos de calibración del modelo	15
Figura 17 Niveles Simulados y Observados en la Estación Vallemí (Periodo de Calibración).....	17
Figura 18 Niveles Simulados y Observados en la Estación Concepción (Periodo de Calibración)	18
Figura 19 Niveles Simulados y Observados en la Estación Pto. Rosario (Periodo de Calibración)	18
Figura 20 Niveles Simulados y Observados en la Estación Asunción (Periodo de Calibración) ..	19
Figura 21 Niveles Simulados y Observados en la Estación Villeta (Periodo de Calibración)	19
Figura 22 Niveles Simulados y Observados en la Estación Alberdi (Periodo de Calibración).....	20
Figura 23 Niveles Simulados y Observados en la Estación Vallemí (Periodo de Validación).....	21
Figura 24 Niveles Simulados y Observados en la Estación Concepción (Periodo de Validación)21	
Figura 25 Niveles Simulados y Observados en la Estación Puerto Rosario (Periodo de Validación).....	22
Figura 26 Niveles Simulados y Observados en la Estación Asunción (Periodo de Validación) ...	22
Figura 27 Niveles Simulados y Observados en la Estación Villeta (Periodo de Validación).....	23
Figura 28 Niveles Simulados y Observados en la Estación Alberdi (Periodo de Validación)	23
Figura 29 Comparativo del Índice de Eficiencia de Nash Sutcliffe para el Periodo de Calibración y Validación	24

Figura 30 Zonas recomendadas para realizar campañas de batimetría. Obs: progresivas referenciadas respecto al cero del Río Paraguay en confluencia. 25

LISTA DE TABLAS

Tabla 1 Espaciamiento entre Secciones Transversales para distintos criterios.....	11
Tabla 2 Datos Observados y Secciones Transversales asociadas.....	12
Tabla 3 Aportes Laterales y Secciones Transversales asociadas.....	12
Tabla 4 Valores de manning para canales (Ven Te Chow, 1959)	13
Tabla 5 Valores de manning para planicies de inundación (Ven Te Chow, 1959)	14
Tabla 6 Trechos de Calibración y Secciones Transversales Asociadas	16
Tabla 7 Criterio de Molnar (2011) para evaluación del desempeño en base al NSE.....	17
Tabla 8 Resultados de las Funciones Objetivos para el Periodo de Calibración	20
Tabla 9 Resultados de las Funciones Objetivos para el Periodo de Validación	23

1. GENERALIDADES

En el presente resumen se exponen los principales resultados obtenidos con el Modelo Hidrodinámico del Río Paraguay, el cual fue elaborado en el marco del proyecto “*Desarrollo e Implementación de un Sistema de Pronóstico de Niveles y Caudales del Río Paraguay*” elaborado en la Universidad Católica Nuestra Señora de la Asunción y financiado por el Consejo Nacional de Ciencias y Tecnologías (CONACYT).

El Río Paraguay es un curso de agua con importantes planicies de inundación a lo largo de su recorrido, por lo que la utilización de modelos hidrodinámicos 1D tienen ciertas limitaciones para representar todos los fenómenos hidráulicos que ocurren. La cantidad y calidad de información batimétrica a lo largo de todo el tramo a simular, juega un papel fundamental a la hora de representar correctamente los niveles observados.

1.1 Software de Modelación Numérica

Para el presente estudio se utilizó el software HEC-RAS (Hydrologic Engineering Center - River Analysis System), que consiste en un Modelo Hidráulico desarrollado por el Cuerpo de Ingenieros del Ejército de los Estados Unidos (USACE, por sus siglas en inglés). Como se menciona en Fan et al (2014), el proceso de propagación de caudal en cursos de agua es generalmente representado con un conjunto de dos ecuaciones, conocidas como las ecuaciones de *Saint-Venant* (1871), o ecuaciones de escurrimiento no permanente unidimensional. Estas ecuaciones se muestran a continuación:

Ecuación de Continuidad

$$\frac{\partial A}{\partial t} + \frac{\partial Q}{\partial x} = q \quad (1)$$

Ecuación de Cantidad de Movimiento o Ecuación Dinámica

$$\frac{\partial Q}{\partial t} + \frac{\partial \left(\frac{Q^2}{A} \right)}{\partial x} + gA \frac{\partial h}{\partial x} = gAS_0 - gAS_f \quad (2)$$

donde:

A = área de la sección transversal al escurrimiento,

Q = caudal que pasa por esa sección,

x = distancia en el sentido longitudinal,

t = tiempo,

q = caudal por unidad de ancho de contribución lateral,

h = profundidad del río,

S_o = pendiente del fondo del río,

S_f = pendiente de la línea de energía.

1.2 Esquema de Modelación

De manera general, el modelo hidráulico de un trecho de río requiere establecer cómo será el comportamiento en sus extremos aguas arriba y aguas abajo, lo que se conoce como condiciones de borde. Esto generalmente se asocia con caudales que ingresan al río en su extremo aguas arriba, y finalmente, alguna de información de nivel o relación entre nivel y caudal en su extremo aguas abajo.

El tramo del Río Paraguay a ser modelado se comprende entre Puerto Murtiño (BR) y Pilar (PY). El esquema conceptual del modelo planteado se resume en lo siguiente: el dato de entrada principal es el caudal que ingresa al Río Paraguay a la altura de Puerto Murtiño, recibiendo también el caudal de los principales aportes laterales a lo largo del trecho, y finalmente, se indica un forzante del nivel de agua en su extremo aguas abajo con los niveles registrados en la estación hidrométrica de Pilar. En la **Figura 1** se observa con más claridad el esquema planteado.

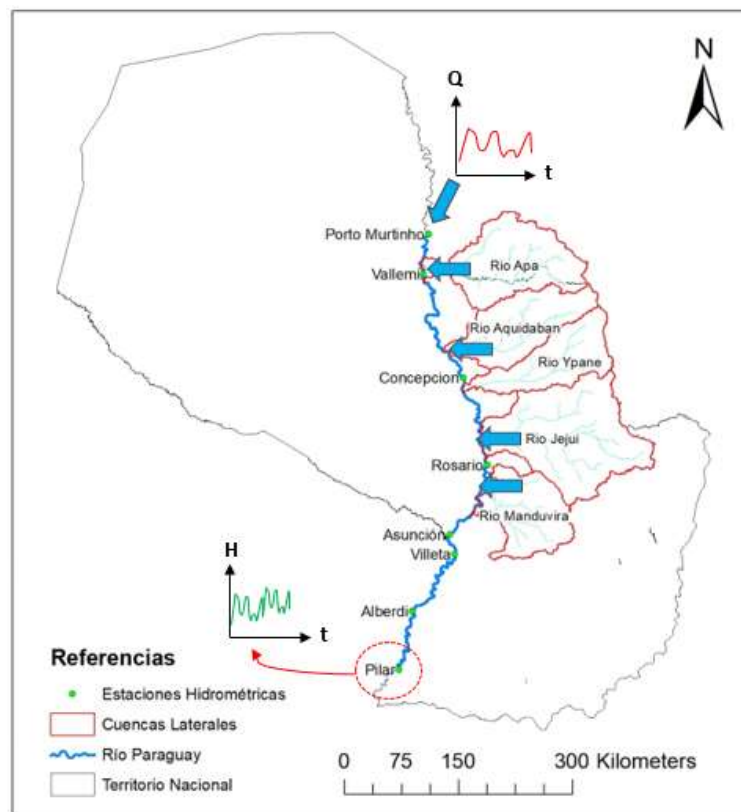


Figura 1 Esquema conceptual de modelación del Río Paraguay

2. RELEVAMIENTO Y SISTEMATIZACIÓN DE LA INFORMACIÓN

2.1 Datos de Topografía

2.1.1 Batimetría

Los datos batimétricos utilizados corresponden a Levantamientos Hidrográficos realizados por la Administración Nacional de Navegación y Puertos (ANNP) en el marco del Proyecto de Dragado del Río Paraguay. Los tramos que cuentan con información batimétrica se muestran en la **Figura 2**.

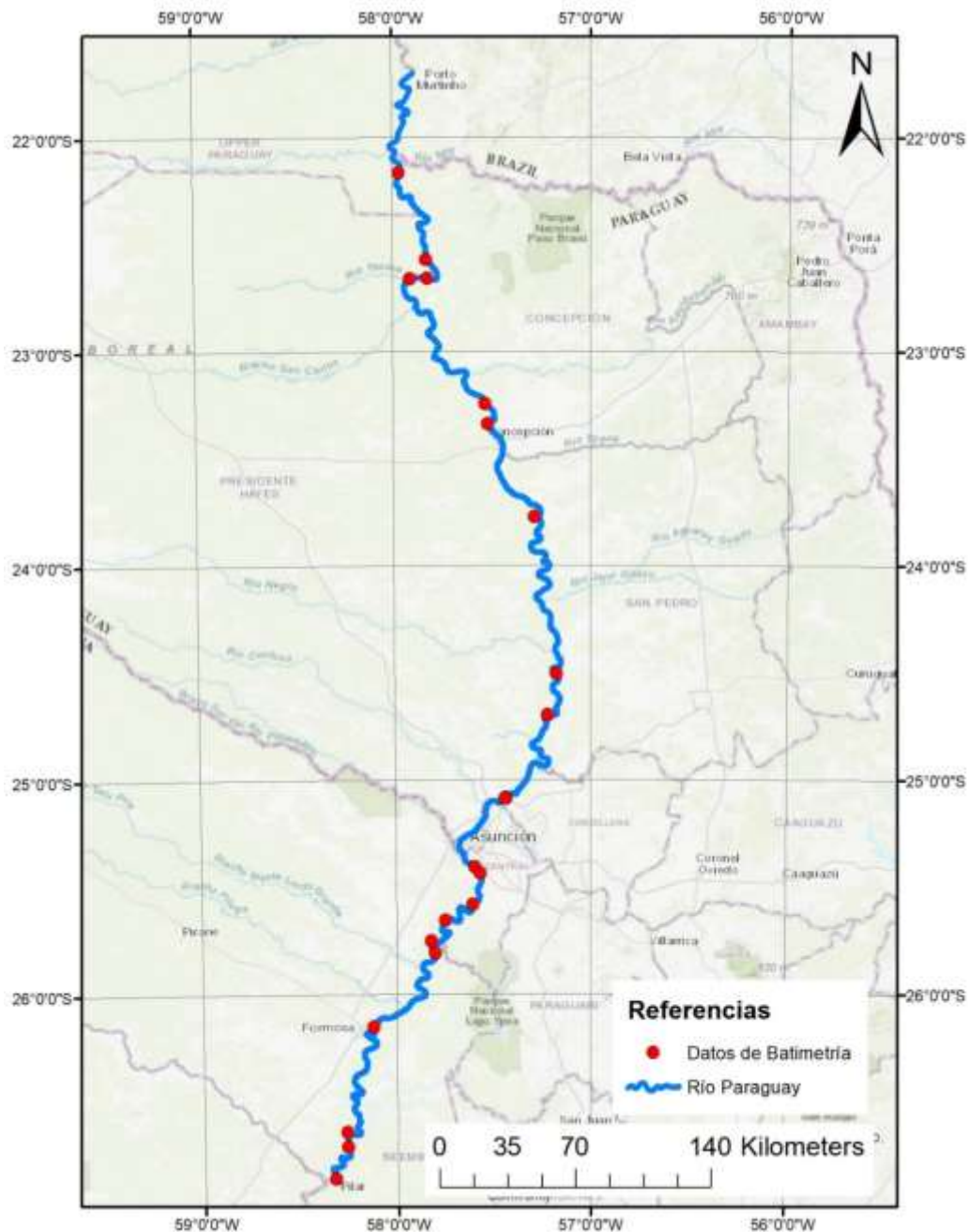


Figura 2 Zonas del Río Paraguay con información batimétrica

Estos datos son utilizados para representar el cauce del Río Paraguay. Las zonas intermedias (donde no existe información batimétrica) son obtenidas a través de una interpolación lineal a lo largo del eje del río. Esto permite construir un cauce continuo para todo el tramo a ser modelado. En la **Figura 3** se muestra un ejemplo de los datos batimétricos.



Figura 3 Ejemplo de datos batimétricos utilizados

2.1.2 Topografía de las Planicies de Inundación

Para representar lo mejor posible la geomorfología de las planicies de inundación, se utilizó el MERIT¹ SRTM² (Yamazaki, et al., 2017), que consiste en un Modelo Digital de Elevación que proviene de un procesamiento realizado sobre el SRTM original (Farr, et al., 2007). De acuerdo a la descripción que realizan los autores, se obtuvieron mejoras significativas respecto al SRTM original, principalmente en regiones planas. Esta mejora se debe a una limpieza de ruidos de distintos tipos, como, por ejemplo, sesgos en la elevación del terreno asociados a la vegetación. Por estas razones, se considera al MERIT SRTM una fuente de información clave para representar las planicies de inundación en Modelación Hidrodinámica. A modo de ejemplo, en la **Figura 4** se muestra la mejoría en la representación de las planicies de inundación del Río Amazonas.

¹ MERIT DEM: Multi-Error-Removed Improved-Terrain DEM

² Shuttle Radar Topography Mission

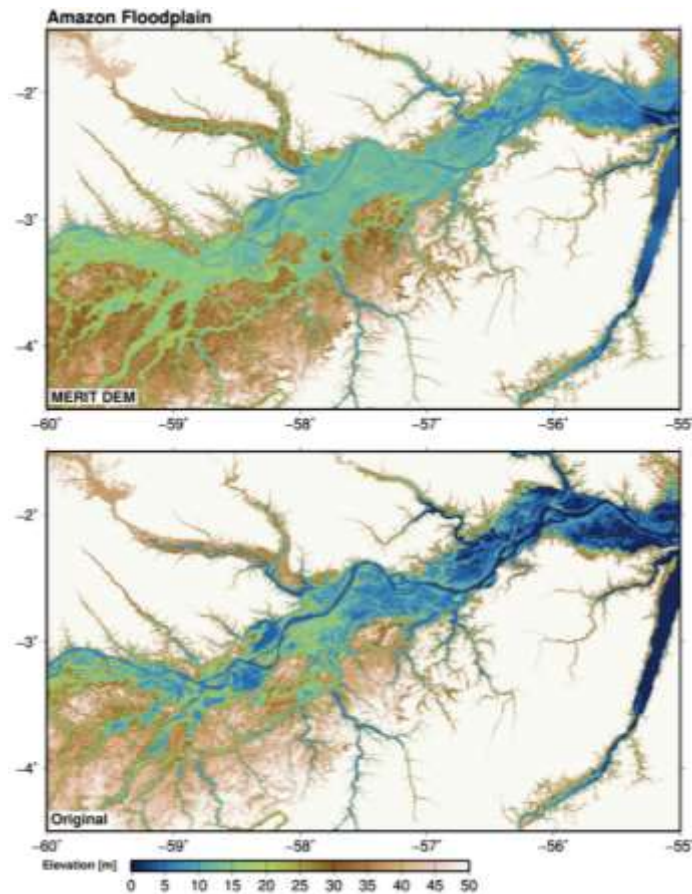


Figura 4 Planicie de Inundación del Río Amazonas. Fuente: (Yamazaki, et. al., 2017).

2.1.3 Construcción del Modelo Digital de Elevación (MDE)

Con el objetivo de obtener secciones transversales en cualquier sitio del Río Paraguay en el tramo comprendido entre Puerto Murtiño (BR) y Pilar (PY), se realiza una fusión entre el MDE creado a partir de los datos batimétricos (cauce) y el MERIT SRTM (planicies de inundación). En la **Figura 5** se puede observar cómo fue construida la geomorfología del río.

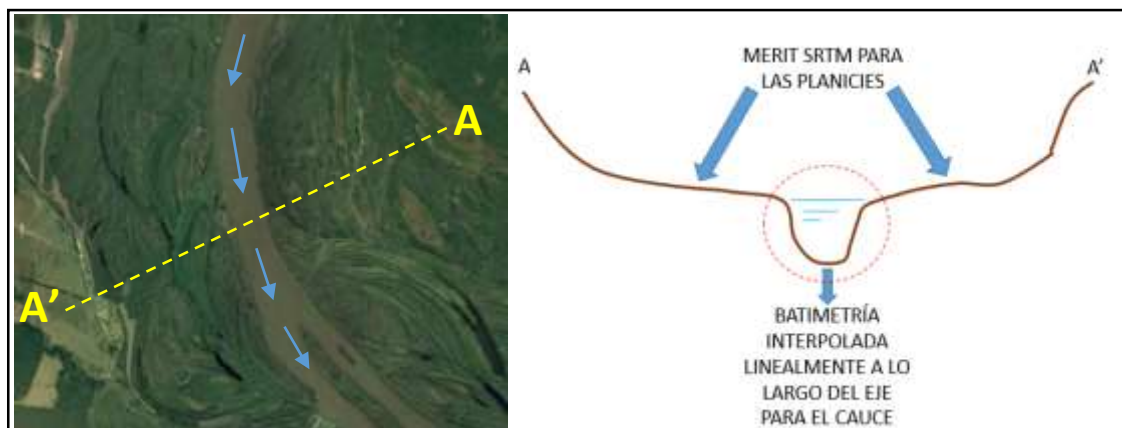


Figura 5 Configuración de la geomorfología del Río Paraguay.

Fusionando estas informaciones, se obtiene un Modelo Digital de Elevación del Río Paraguay con su cauce incluido, tal como se muestra en la **Figura 6** y **Figura 7**.

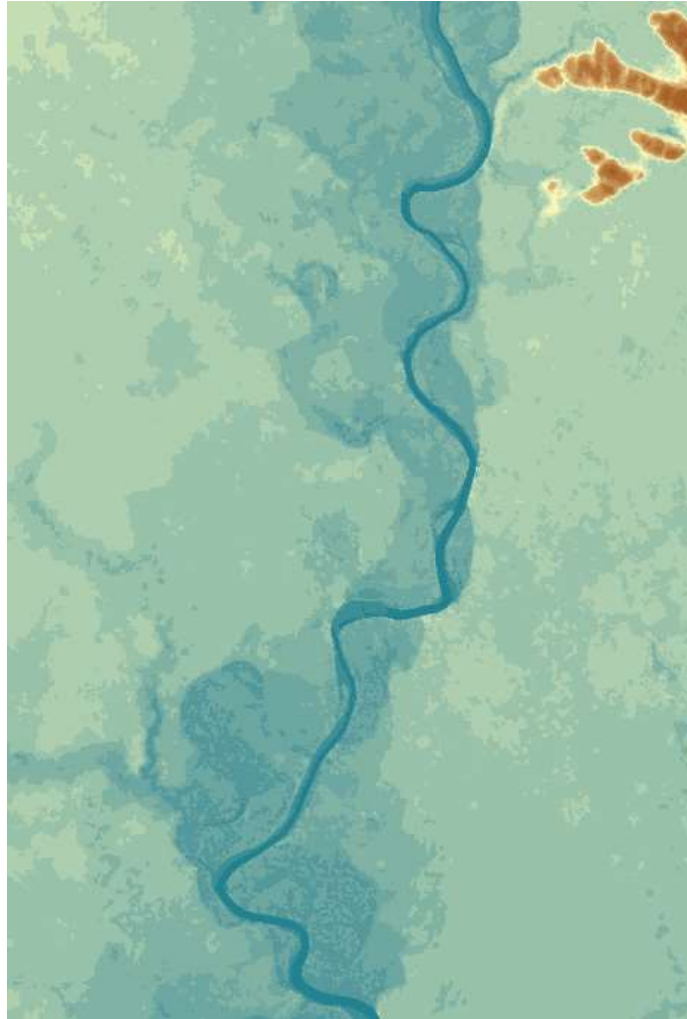


Figura 6 Tramo del Río Paraguay en Planta con cauce incorporado (MDE: MERIT SRTM)

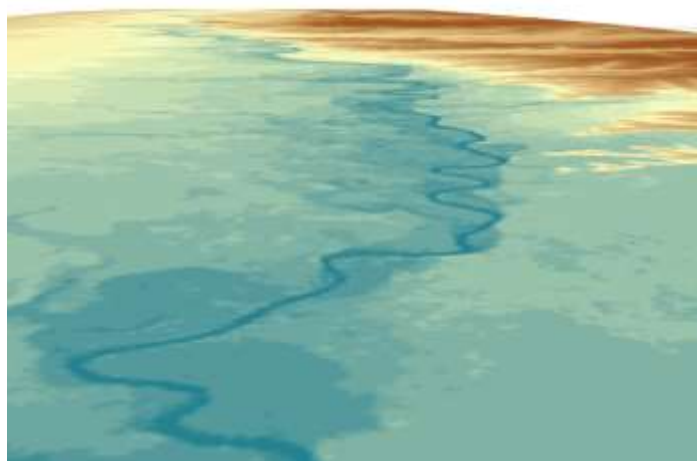


Figura 7 Tramo del Río Paraguay en perspectiva con cauce incorporado (MDE: MERIT SRTM)

2.2 Datos de Niveles Observados

Los Modelos Hidráulicos requieren datos observados de nivel a lo largo del trecho a simular, lo cual permite ajustar los niveles simulados para que repliquen lo mejor posible la realidad. Para el presente trabajo, se utilizaron datos observados de las estaciones hidrométricas de Vallemí, Concepción, Puerto Rosario, Asunción, Villeta, Alberdi y Pilar, los cuales fueron facilitados por la ANNP. Estos datos se muestran en la **Figura 8**.



Figura 8 Datos de Niveles Observados. Periodo: 2006 – 2018

En muchos casos, parte de la serie original de cada estación carecía de datos. Cuando la falta de datos se daba en un periodo relativamente pequeño (pocos días) se optó por una simple interpolación lineal. Sin embargo, cuando la falta de datos se daba en periodos largos (meses) se optó por completar lo faltante mediante correlaciones entre las estaciones hidrométricas utilizadas. En las siguientes figuras se muestran algunas correlaciones utilizadas entre estaciones para completar datos faltantes.

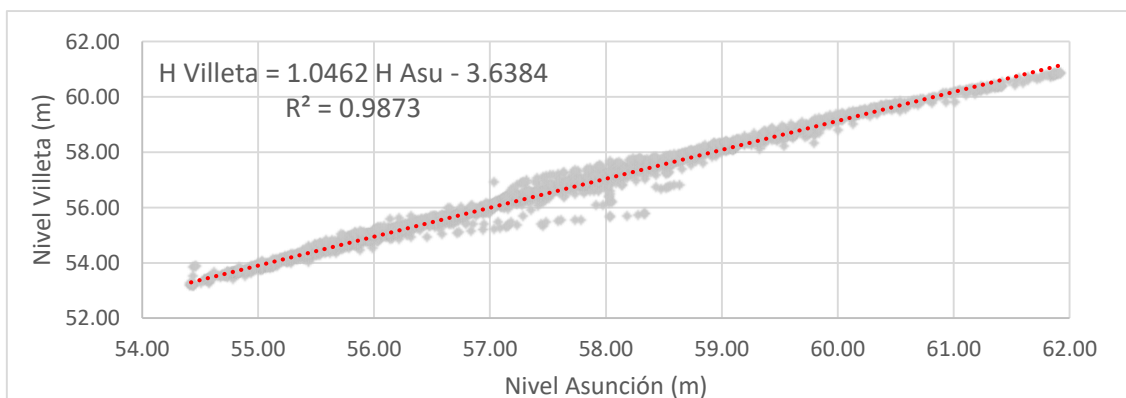


Figura 9 Correlación entre niveles registrados en Asunción y Villeta

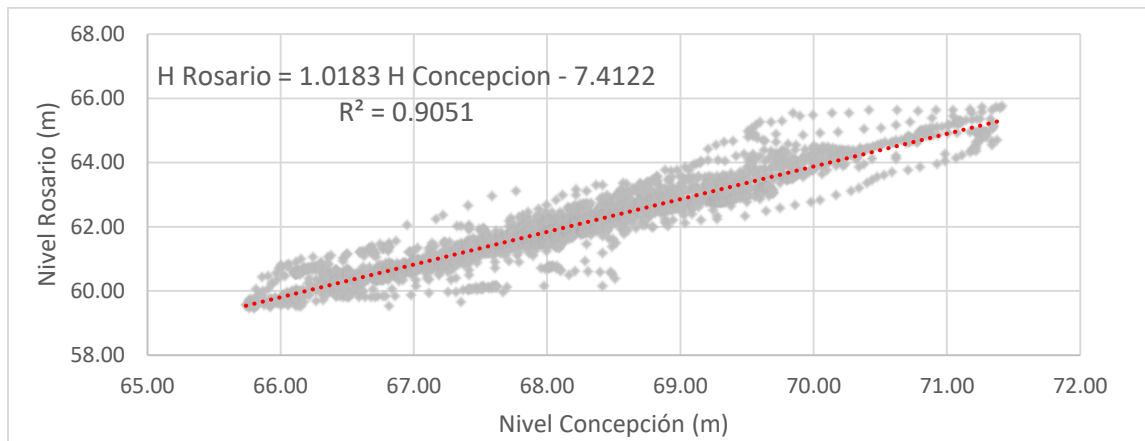


Figura 10 Correlación entre niveles registrados en Puerto Rosario y Concepción

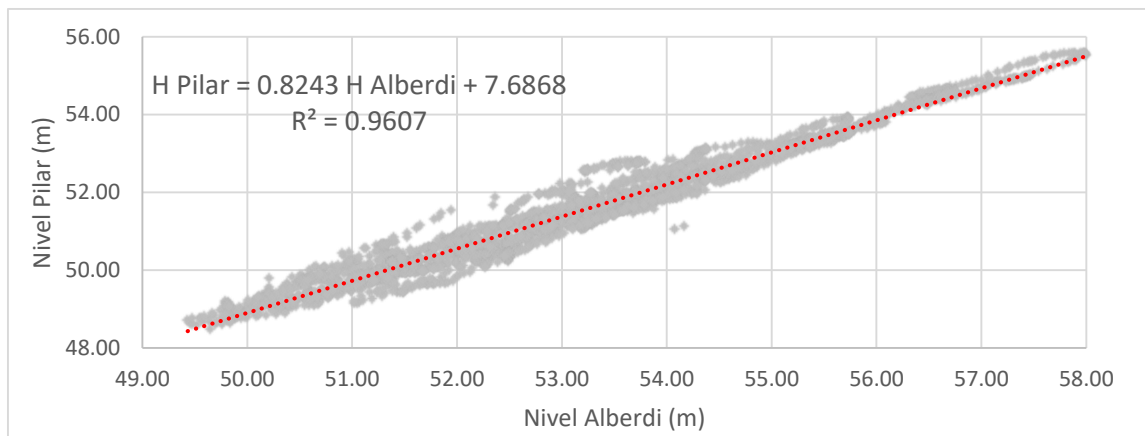


Figura 11 Correlación entre niveles registrados en Alberdi y Pilar

2.3 Datos de Caudal

En la Estación Puerto Murtiño existen datos de caudal medido, con lo cual, es posible construir una Curva H-Q, tal como se muestra en la **Figura 12**.

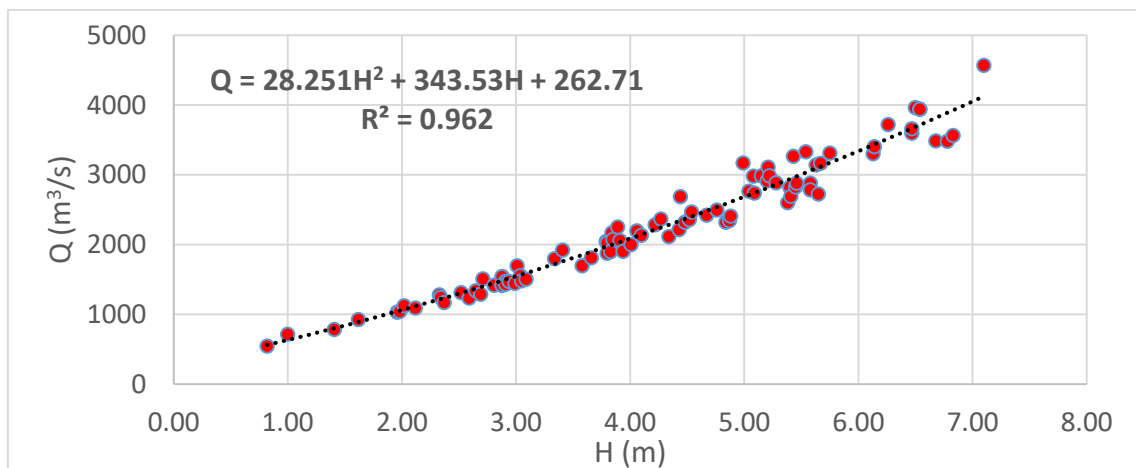


Figura 12 Curva Altura-Caudal en Puerto Murtiño

Los datos hidrométricos son transformados a caudal mediante la relación que se muestra en la **Figura 12**, obteniendo la serie de caudales que se muestra en la **Figura 13**.

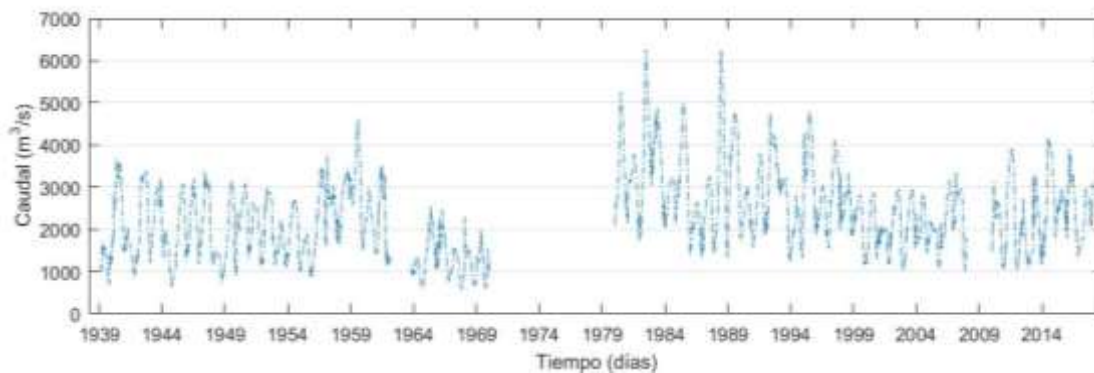


Figura 13 Serie de Caudal en Puerto Murtiño (*Periodo: 1939 – 2018*)

Es oportuno aclarar que el *Sistema de Hidro Telemetría de la Red Hidrometeorológica Nacional del ANA*, pone a disposición en su *página web*³ datos verificados de nivel y caudal registrados en la estación Puerto Murtiño. Con esta información, no se requiere la utilización de la curva H-Q en lo que se refiere al Sistema de Previsión del presente trabajo, considerando que directamente se cuenta con información de caudal (controlada y verificada por el ANA).

³ <http://www.snirh.gov.br/gestorpcd/exportarDados.aspx>

3. MODELO HIDRODINÁMICO

3.1 Geometría

Para la generación de la geometría del modelo se utilizó el HEC-GeoRAS, que consiste en un complemento SIG para desarrollar toda la configuración de secciones transversales. Básicamente, se define la ubicación y la extensión de las secciones transversales de tal manera a representar lo mejor posible la variabilidad del río a lo largo del trecho de simulación.

3.1.1 Espaciamiento entre secciones transversales

Para el presente trabajo se utilizó el criterio de Samuels (1990), que para modelos hidrodinámicos no permanentes sugiere seguir las siguientes recomendaciones o criterios:

a. Criterio del Ancho de Río

$$\Delta x \approx kB \quad (3)$$

donde:

Δx : espaciamiento entre secciones

B : ancho del río operando a banca llena

k : constante cuyo valor oscila entre 10 y 20

b. Criterio de los efectos de remanso en régimen subcrítico

$$\Delta x < 0.2 \frac{(1-F^2)D}{s} \approx 0.2 \frac{D}{s} \text{ cuando } F^2 \rightarrow 0 \quad (4)$$

donde:

D : profundidad del río operando a sección llena

s : pendiente media del cauce principal

c. Criterio de Propagación de Onda

$$\Delta x < \frac{cT}{N_{gp}} \quad (5)$$

donde:

T : periodo de la onda

c : velocidad de la onda

N_{gp} : número de puntos en la grilla (generalmente entre 30 a 50)

De acuerdo a estos criterios, se calculan valores aproximados de espaciamiento entre secciones, tal como se muestra en la **Tabla 1**.

Tabla 1 Espaciamiento entre Secciones Transversales para distintos criterios

ANCHO	
B (m)	1000
k	15
ΔX (m)	15000
REMANSO	
F	0
D (m)	10
S (m/m)	0.00005
ΔX (m)	40000
PROPAGACIÓN DE ONDA	
C (m/s)	0.46
T (seg)	1296000
Ngp	40
ΔX (m)	14904

Estos valores indican que el espaciamiento entre secciones transversales debería fijarse en valores inferiores a 14904 m. En base a estas consideraciones, se estructuró la ubicación de las secciones transversales, tal como se muestra en la **Figura 14**.

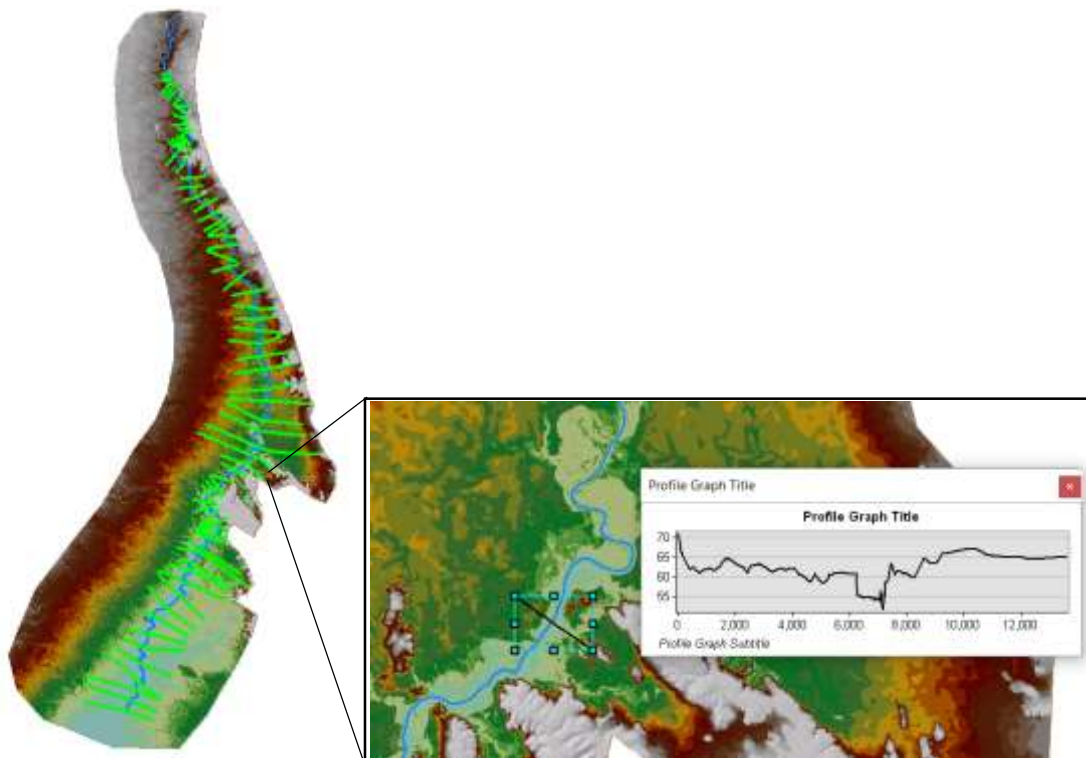


Figura 14 Secciones transversales trazadas sobre el MDE (líneas verdes)

Las condiciones de borde y los datos observados son asociados a algunas secciones transversales del modelo. En las siguientes tablas se muestran las secciones transversales seleccionadas para incluir los datos observados y las condiciones de borde.

Tabla 2 Datos Observados y Secciones Transversales asociadas

ESTACIÓN	SECCIÓN (HEC-RAS)		CERO HIDROMÉTRICO
Porto Murtinho	883030	Caudal del Río Paraguay	71.46
Vallemi	808030.7	Nivel Observado p/ Calibración	70.39
Concepción	603968.7	Nivel Observado p/ Calibración	64.42
Rosario	448034.6	Nivel Observado p/ Calibración	58.34
Asunción	289274	Nivel Observado p/ Calibración	54.04
Villeta	256579	Nivel Observado p/ Calibración	52.86
Alberdi	123083	Nivel Observado p/ Calibración	48.19
Pilar	1750.016	Nivel Observado p/ Condición de Borde	46.46

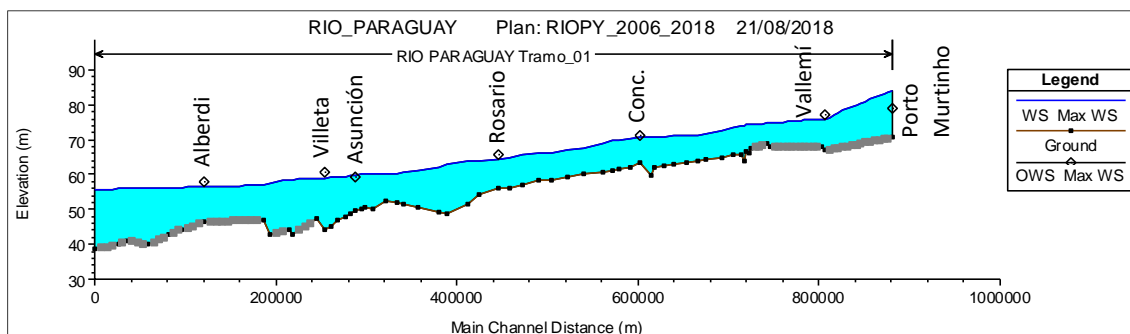


Figura 15 Perfil Longitudinal del Río Paraguay en el entorno HEC-RAS

Tabla 3 Aportes Laterales y Secciones Transversales asociadas

SECCIÓN (HEC-RAS)	INGRESO DE CAUDAL
814030	Río Apa
630056.7	Río Aquidabán
579908.6	Río Ypané
459962.3	Río Jejuí
343592.6	Río Manduvirá

3.1.2 Valores de Rugosidad de Manning

En modelación hidráulica, uno de los parámetros más sensibles es el coeficiente de rugosidad de manning. Este valor depende de diversos factores, como el material del lecho, la cobertura vegetal existente, entre otros. En la literatura especializada existen diversas tablas y criterios para estimar este valor. Uno de los criterios más conocidos es el método de cowan (ec. 6), que básicamente consiste en una ponderación del valor manning de acuerdo a varias características del cauce, tal como se muestra en la **Tabla 4**.

$$n_{canal} = (n_0 + n_1 + n_2 + n_3 + n_4) m \quad (6)$$

Tabla 4 Valores de manning para canales (Ven Te Chow, 1959)

Condiciones del Canal		Valores	
Material Involucrado	Tierra	n0	0.02
	Corte en roca		0.025
	Grava Fina		0.024
	Grava Gruesa		0.028
Grado de Irregularidad	Suave	n1	0
	Menor		0.005
	Moderado		0.01
	Severo		0.02
Variaciones de la Sección Transversal	Gradual	n2	0
	Ocasionalmente Alternante		0.005
	Frecuentemente Alternante		0.01 - 0.015
Efecto relativo de las obstrucciones	Insignificante	n3	0
	Menor		0.01 - 0.015
	Apreciable		0.02 - 0.03
	Severo		0.04 - 0.06
Vegetación	Baja	n4	0.005 - 0.01
	Media		0.01 - 0.025
	Alta		0.025 - 0.05
	Muy Alta		0.05 - 0.1
Grado de los efectos por meandros	Menor	m	1
	Apreciable		1.15
	Severo		1.3

La selección de una rugosidad base para el Río Paraguay fue realiza asumiendo que se trata de un río con lecho de tierra, grado de irregularidad suave, variaciones en la sección transversal gradual, efectos de obstrucciones insignificantes, vegetación baja y efecto de meandros menor. Con estas características, la aplicación del método de cowan sugiere que $n_{canal} = 0.025$.

Respecto a la rugosidad de las planicies de inundación, se utiliza el criterio que se muestra en la **Tabla 5**.

Tabla 5 Valores de manning para planicies de inundación (Ven Te Chow, 1959)

PLANICIES DE INUNDACIÓN	Mínimo	Normal	Máximo
a. Pastizales, sin matorrales			
Pasto Corto	0.025	0.03	0.035
Pasto Alto	0.03	0.035	0.05
b. Áreas Cultivadas			
Sin Cultivo	0.02	0.03	0.04
Cultivos en línea maduros	0.025	0.035	0.045
Campos de cultivo maduros	0.03	0.04	0.05
c. Matorrales			
Matorrales dispersos, mucha maleza	0.035	0.05	0.07
Pocos matorrales y árboles, en invierno	0.035	0.05	0.06
Pocos matorrales y árboles, en verano	0.04	0.06	0.08
Matorrales medios a densos, en invierno	0.045	0.07	0.11
Matorrales medios a densos, en verano	0.07	0.1	0.16
d. Árboles			
Sauces densos, rectos y en verano	0.11	0.15	0.2
Terreno Limpio, con troncos sin retoños	0.03	0.04	0.05
Terreno Limpio, con troncos con retoños	0.05	0.06	0.08
Gran cantidad de árboles, algunos troncos caídos, con poco crecimiento de matorrales, nivel de agua por debajo de las ramas	0.08	0.1	0.12
Gran cantidad de árboles, algunos troncos caídos, con poco crecimiento de matorrales, nivel de agua por encima de las ramas	0.1	0.12	0.16

Para el Río Paraguay, se consideran valores asociados a matorrales medios a densos, tanto en verano como en invierno. Se adopta un valor $n_{\text{planicies}} = 0.08$.

Es importante considerar que los valores del coeficiente de rugosidad de manning que fueron estimados son tan solo una base, y pueden ser ligeramente inferior o considerablemente superior de acuerdo al caudal que fluye por el río. Estas variaciones del valor de n manning de acuerdo al caudal son obtenidas en el periodo de calibración, de tal manera a conseguir un ajuste del modelo hidráulico que sea lo más representativo posible a la realidad.

3.2 Calibración

3.2.1 Generalidades

Básicamente, el proceso de calibración consiste en la modificación de ciertos parámetros de un modelo con el objetivo de que los resultados simulados repliquen lo mejor posible la realidad. En el caso de un modelo hidráulico, esto significa un ajuste de parámetros (principalmente la rugosidad) para que los niveles simulados repliquen lo mejor posible los niveles observados.

Teniendo en cuenta la distribución de estaciones que cuentan con registros de nivel a lo largo del Río Paraguay, se identificaron 7 (siete) trechos de calibración, tal como se muestra en la **Figura 16** y en la **Tabla 6**.

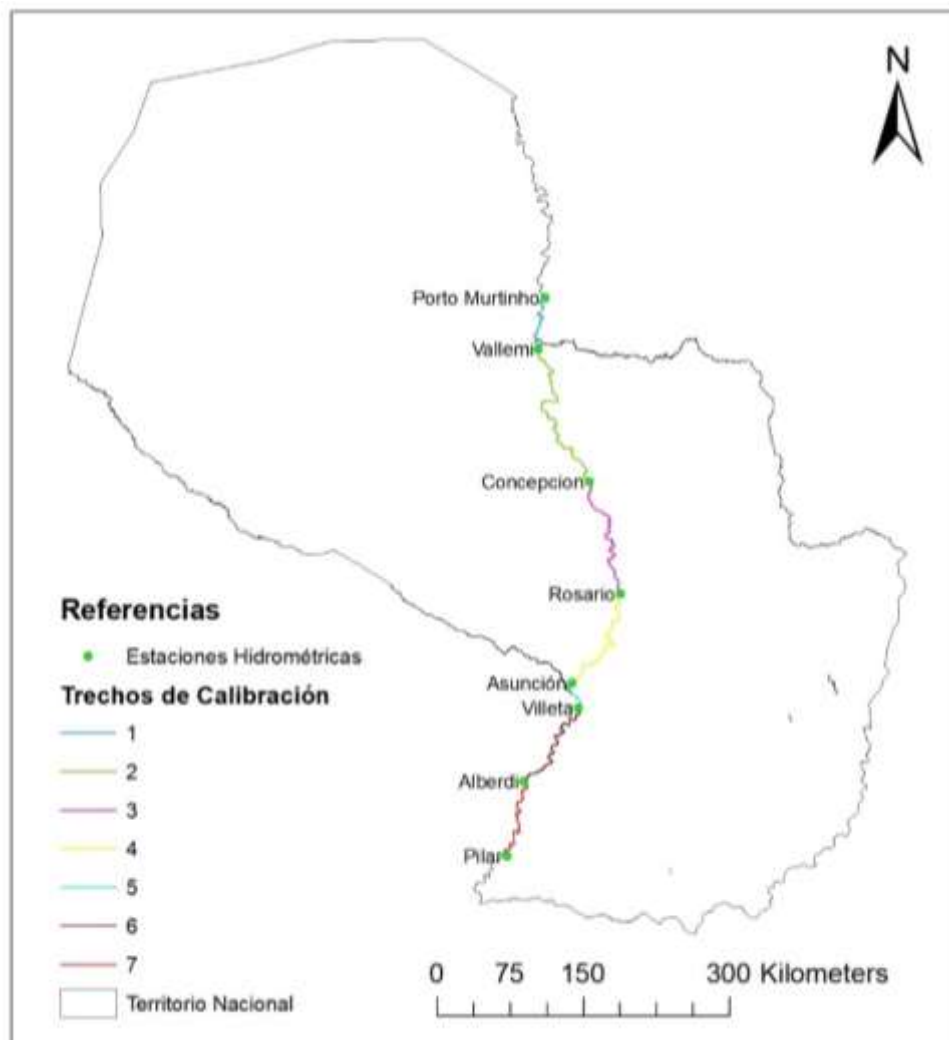


Figura 16 Trechos de calibración del modelo

Tabla 6 Trechos de Calibración y Secciones Transversales Asociadas

TRECHO DE CALIBRACIÓN	Estación Inicial	Estación Final
Trecho 1: Vallemi	808030.7	615925.3
Trecho 2: Concepción	603968.7	459962.3
Trecho 3: Rosario	448034.6	296526.8
Trecho 4: Asunción	289274	262573.4
Trecho 5: Villeta	256579	137288.8
Trecho 6: Alberdi	123083	1750.016

Estos trechos de calibración tendrán distintos factores de rugosidad de acuerdo al caudal, de tal manera a replicar lo mejor posible los niveles observados en todas las estaciones hidrométricas disponibles. El periodo de calibración seleccionado es 2012 – 2018 (7 años).

3.2.2 Evaluación de Desempeño del Modelo

La evaluación de desempeño del modelo se realiza con las siguientes funciones objetivo:

- Diferencia de Valores Medios (MED): es una medida del corrimiento sistemático del nivel calculado respecto del observado. Un valor nulo indica que no existe corrimiento.

$$MED = \overline{H_{SIM}} - \overline{H_{OBS}} \quad (7)$$

Donde:

$\overline{H_{SIM}}$: promedio de niveles simulados

$\overline{H_{OBS}}$: promedio de niveles observados

- Raíz del Error Cuadrático Medio (RMSE): la Raíz del Error Cuadrático Medio permite cuantificar la magnitud de la desviación de los valores simulados respecto a los observados. El rango de valores puede ir desde 0 hasta infinito. El 0 corresponde a un ajuste perfecto.

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (H_{SIM_i} - H_{OBS_i})^2} \quad (8)$$

Donde:

H_{SIM_i} : niveles simulados

H_{OBS_i} : niveles observados

n : cantidad de datos de la serie

- Índice de Eficiencia de Nash Sutcliffe (NSE): es un estadístico normalizado que indica cuanto de la variabilidad de las observaciones es explicada por la simulación. Varía entre $-\infty$ y 1, donde 1 es un ajuste óptimo. Valores negativos indican que la media de los datos observados es un mejor predictor que los valores simulados.

$$NSE = 1 - \left[\frac{\sum_{i=1}^n (H_{OBS_i} - H_{SIM_i})^2}{\sum_{i=1}^n (H_{OBS_i} - \overline{H_{OBS}})^2} \right] \quad (9)$$

De acuerdo al criterio de Molnar (2011), la evaluación del desempeño del modelo en base al estadístico NSE se da como se muestra en la **Tabla 7**.

Tabla 7 Criterio de Molnar (2011) para evaluación del desempeño en base al NSE

NSE	AJUSTE
<0.2	Insuficiente
0.2 - 0.4	Satisfactorio
0.4 - 0.6	Bueno
0.6 - 0.8	Muy Bueno
> 0.8	Excelente

En las siguientes figuras se muestran los resultados obtenidos en el periodo de calibración para cada estación hidrométrica. En la **Tabla 8** se muestra un resumen del desempeño del modelo.

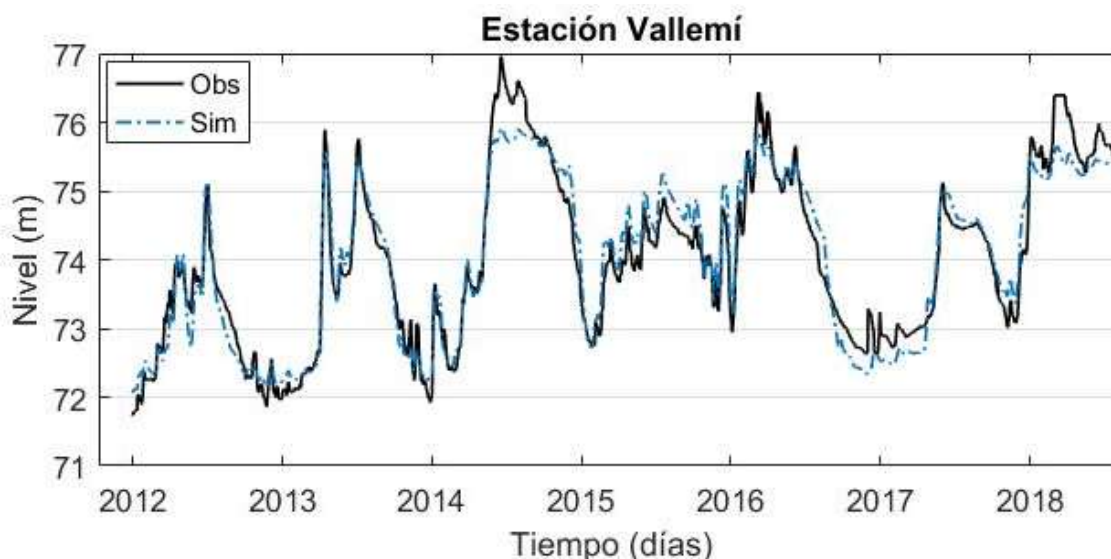


Figura 17 Niveles Simulados y Observados en la Estación Vallemí (Periodo de Calibración)

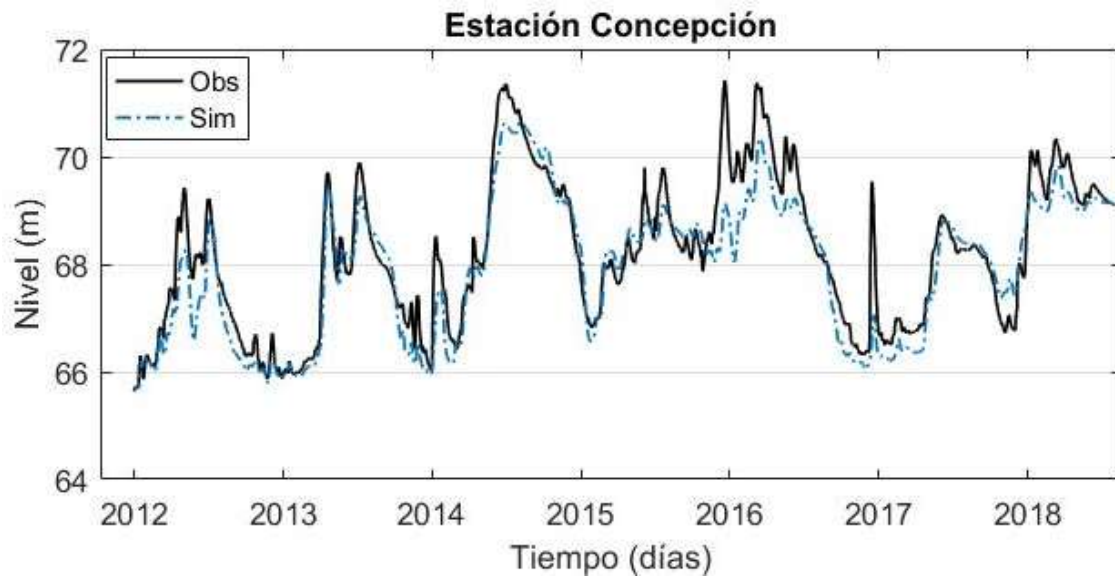


Figura 18 Niveles Simulados y Observados en la Estación Concepción (Periodo de Calibración)

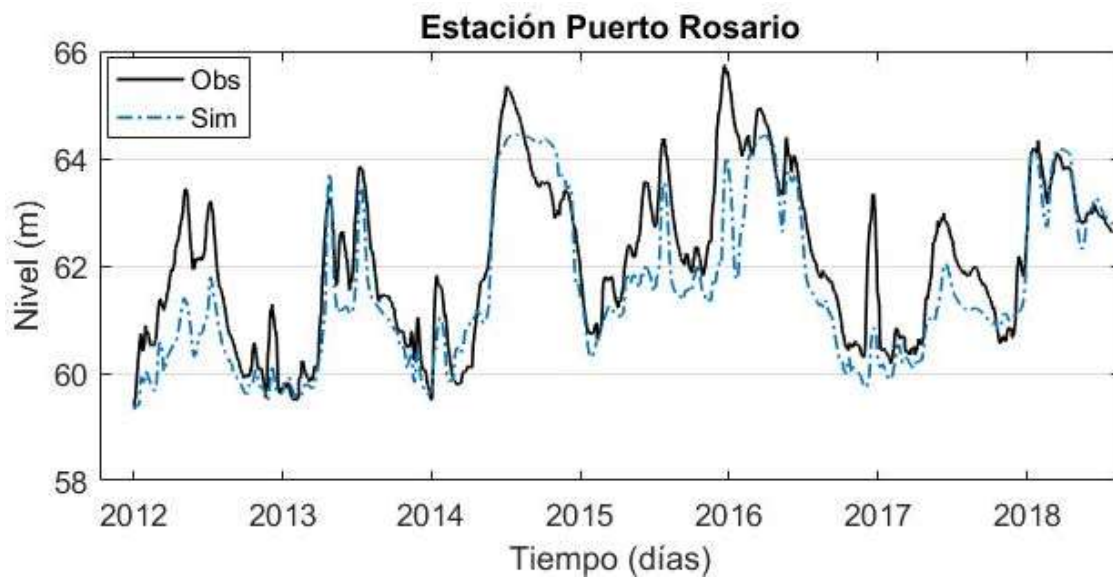


Figura 19 Niveles Simulados y Observados en la Estación Pto. Rosario (Periodo de Calibración)

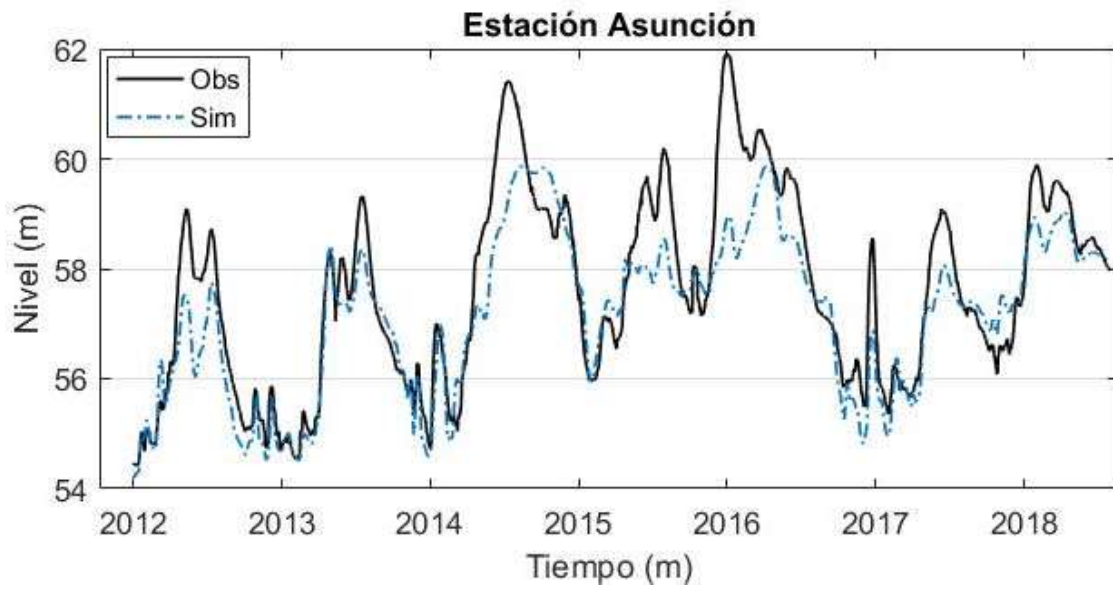


Figura 20 Niveles Simulados y Observados en la Estación Asunción (Periodo de Calibración)



Figura 21 Niveles Simulados y Observados en la Estación Villeta (Periodo de Calibración)

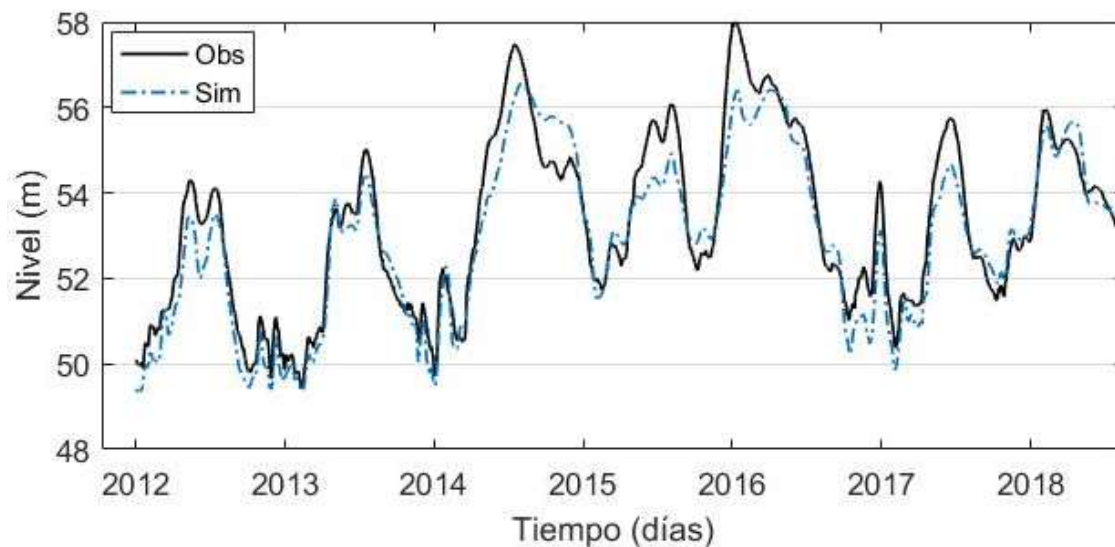


Figura 22 Niveles Simulados y Observados en la Estación Alberdi (Periodo de Calibración)

Tabla 8 Resultados de las Funciones Objetivos para el Periodo de Calibración

Estación	MED	RMSE	NSE	Desempeño
VALLEMÍ	0.32	0.30	0.93	Excelente
CONCEPCIÓN	0.87	0.77	0.60	Bueno
ROSARIO	0.72	0.67	0.76	Muy Bueno
ASUNCIÓN	0.86	0.65	0.76	Muy Bueno
VILLETA	0.93	0.48	0.74	Muy Bueno
ALBERDI	0.74	0.59	0.86	Excelente

*Obs: evaluación de desempeño en base al criterio de Molnar (2011), especificado en la **Tabla 7***

3.3 Validación

Refsgaard & Knudsen (1996) definen la validación de un modelo como “el proceso de demostración que el modelo es capaz de hacer predicciones en un lugar específico determinado para períodos fuera del período de calibración”. De esta manera, se dice que un modelo ha sido validado si su precisión y capacidad predictiva en el período de validación muestran errores o límites aceptables. El periodo de validación seleccionado es 2006 – 2011 (4 años). Los resultados obtenidos en cada estación se muestran en las siguientes figuras, mientras que en la **Tabla 9** se muestra un resumen de las Funciones Objetivo que evalúan el desempeño.

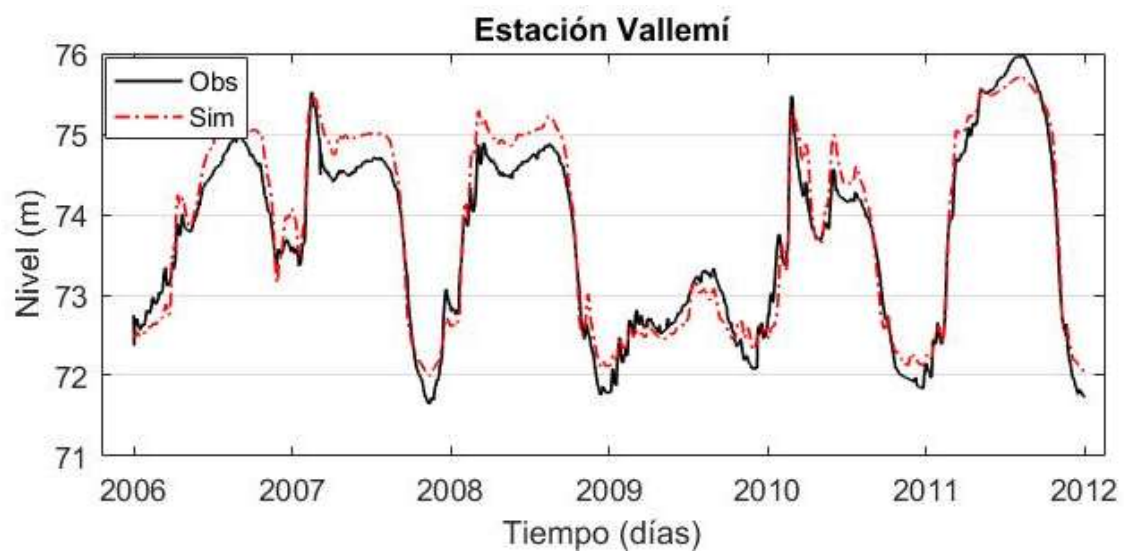


Figura 23 Niveles Simulados y Observados en la Estación Vallemí (Periodo de Validación)

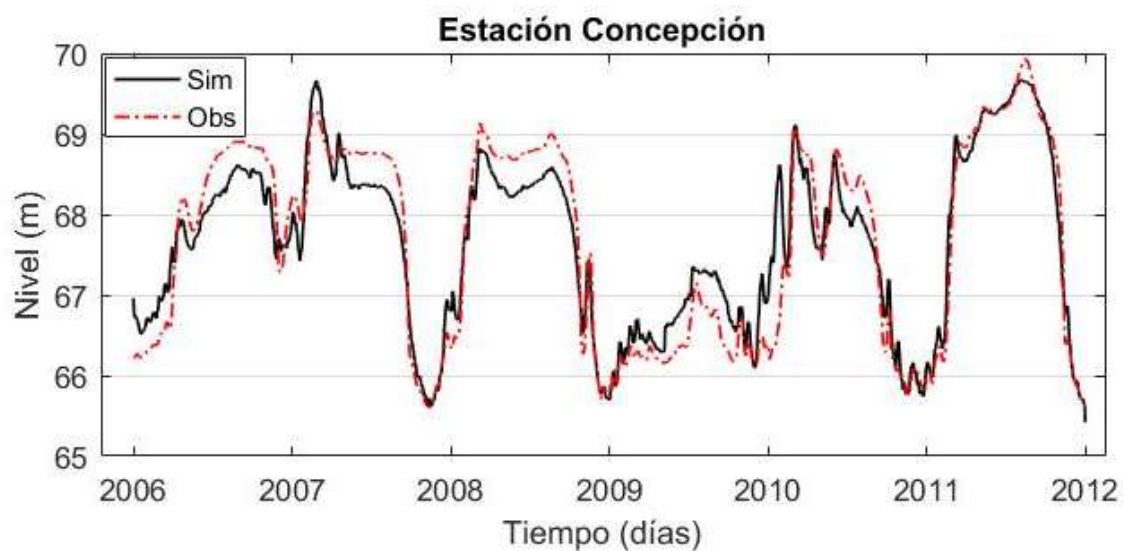


Figura 24 Niveles Simulados y Observados en la Estación Concepción (Periodo de Validación)

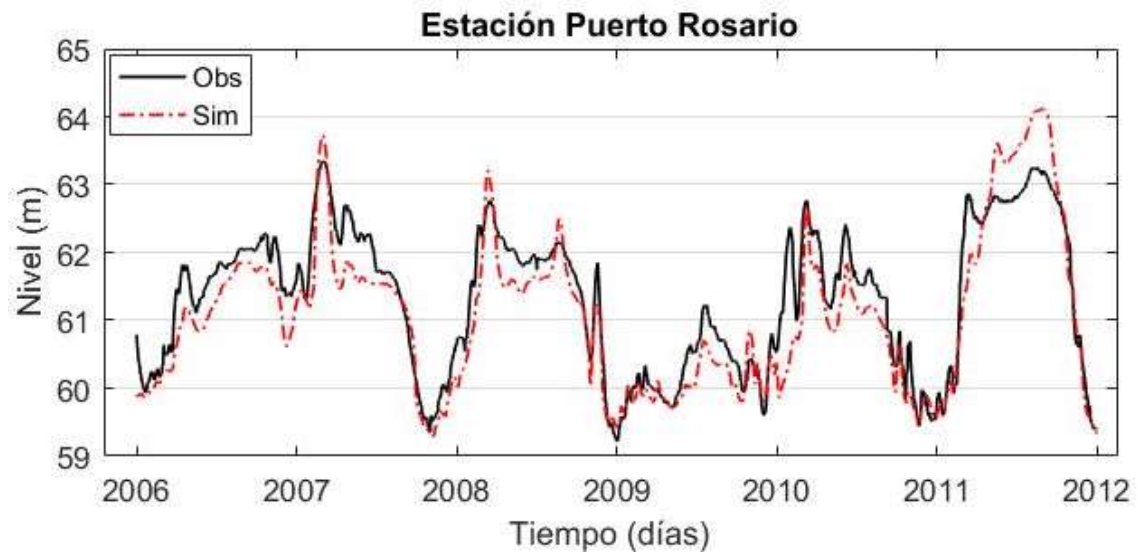


Figura 25 Niveles Simulados y Observados en la Estación Puerto Rosario (Periodo de Validación)

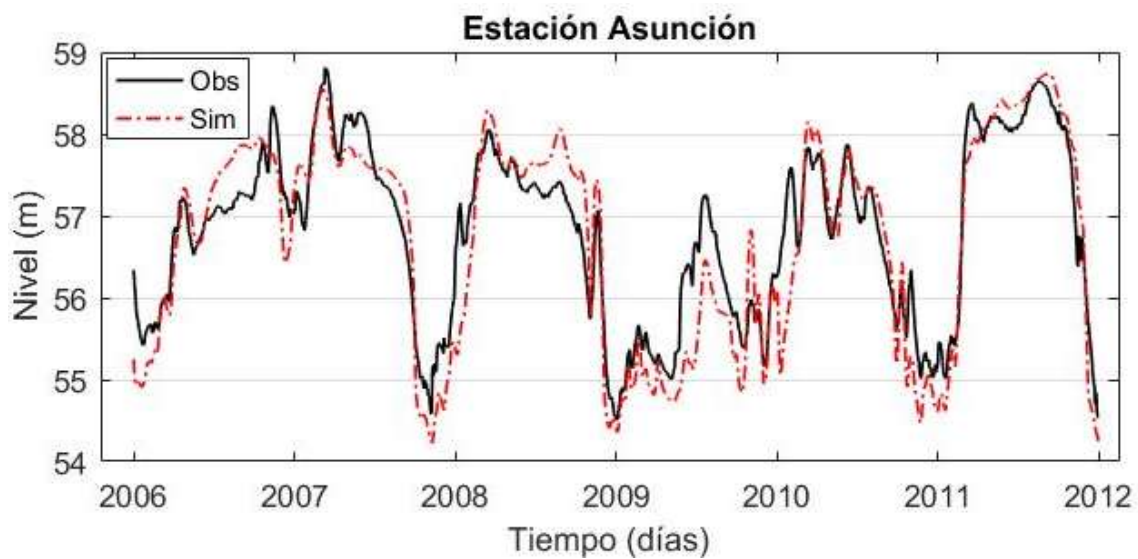


Figura 26 Niveles Simulados y Observados en la Estación Asunción (Periodo de Validación)

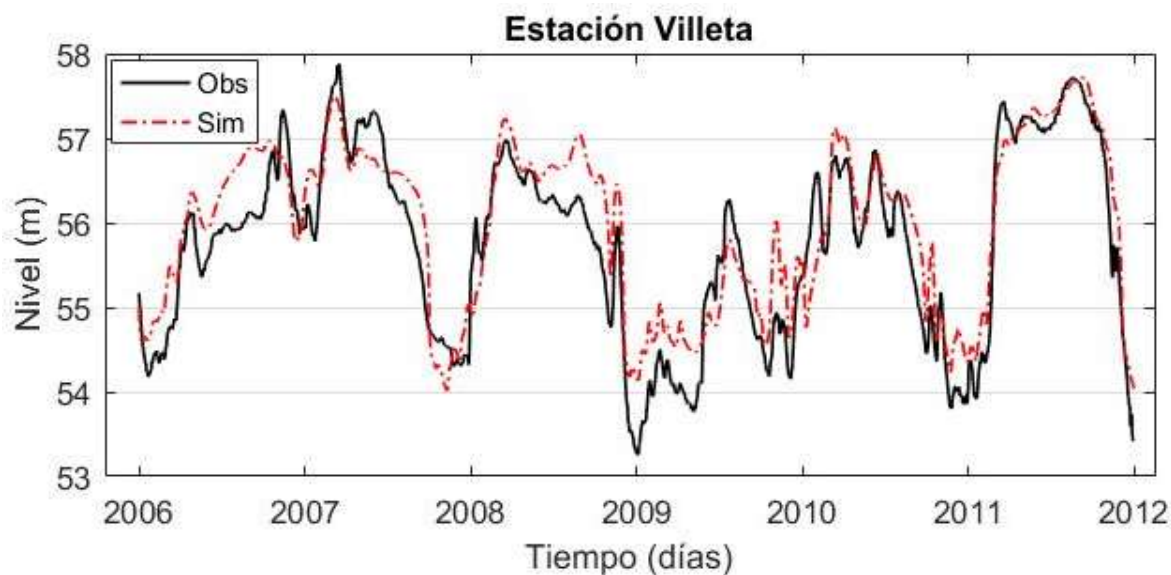


Figura 27 Niveles Simulados y Observados en la Estación Villeta (Periodo de Validación)

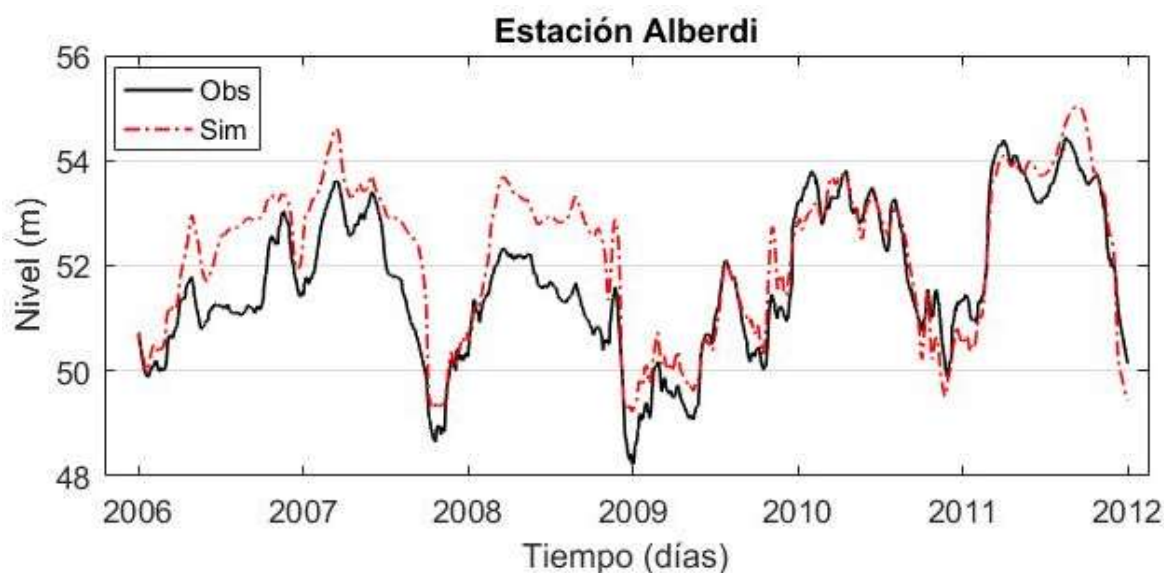


Figura 28 Niveles Simulados y Observados en la Estación Alberdi (Periodo de Validación)

Tabla 9 Resultados de las Funciones Objetivos para el Periodo de Validación

Estación	MED	RMSE	NSE	Desempeño
VALLEMÍ	0.13	0.28	0.94	Excelente
CONCEPCIÓN	0.02	0.38	0.87	Excelente
ROSARIO	0.24	0.47	0.80	Excelente
ASUNCIÓN	-0.09	0.49	0.79	Muy Bueno
VILLETA	0.24	0.48	0.81	Excelente
ALBERDI	0.54	0.85	0.63	Muy Bueno

*Obs: evaluación de desempeño en base al criterio de Molnar (2011), especificado en la **Tabla 7***

4. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

En términos generales, el Modelo Hidrodinámico del Río Paraguay representa correctamente el comportamiento hidráulico en la mayoría de las estaciones hidrométricas. En el periodo de calibración se obtuvieron buenos resultados en todas las estaciones hidrométricas, sin embargo, en el periodo de validación se observan resultados poco representativos en la estación de Concepción y Alberdi, lo cual podría estar asociado a una representación incompleta de la geomorfología del río/planicie en estos trechos.

Considerando que el objetivo del presente trabajo es utilizar el Modelo Hidrodinámico para la previsión de niveles en Asunción, se considera que los resultados son satisfactorios. Se mostró claramente que el modelo tiene capacidad predictiva en la estación Asunción, teniendo en cuenta el desempeño semejante en el periodo de calibración y validación, donde NSE se mantuvo entre 0.76 y 0.79, respectivamente, tal como se muestra en la **Figura 29**.

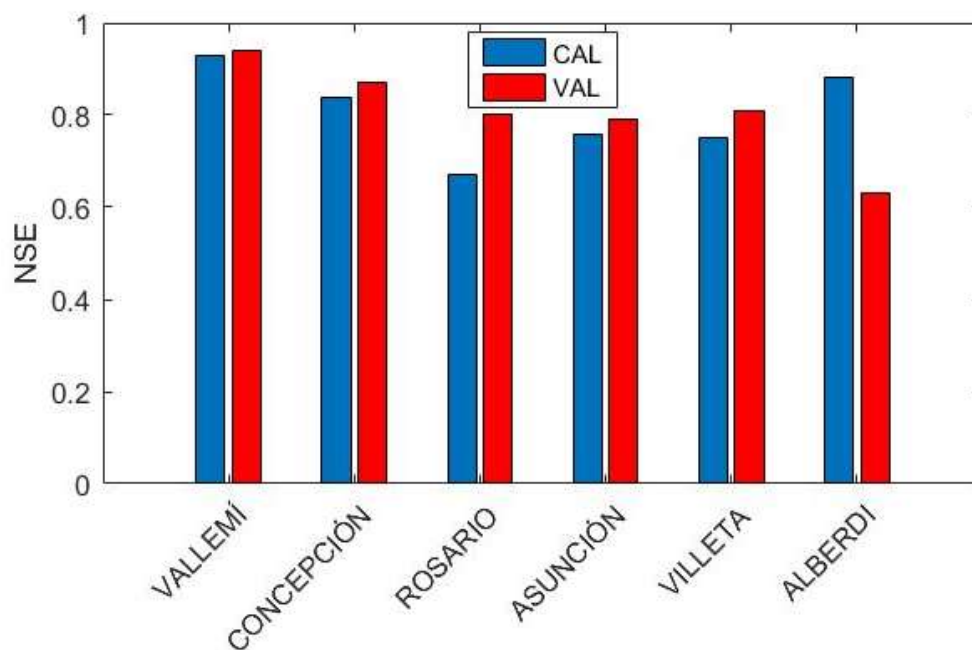


Figura 29 Comparativo del Índice de Eficiencia de Nash Sutcliffe para el Periodo de Calibración y Validación

Los resultados obtenidos pueden ser considerablemente mejorados si se incorpora al modelo mayor información batimétrica, lo cual reduciría considerablemente incertidumbres asociadas a la variabilidad de la pendiente y sección del cauce del río a lo largo del trecho de estudio. En la **Figura 30** se muestran los trechos donde se recomienda realizar campañas de batimetría.

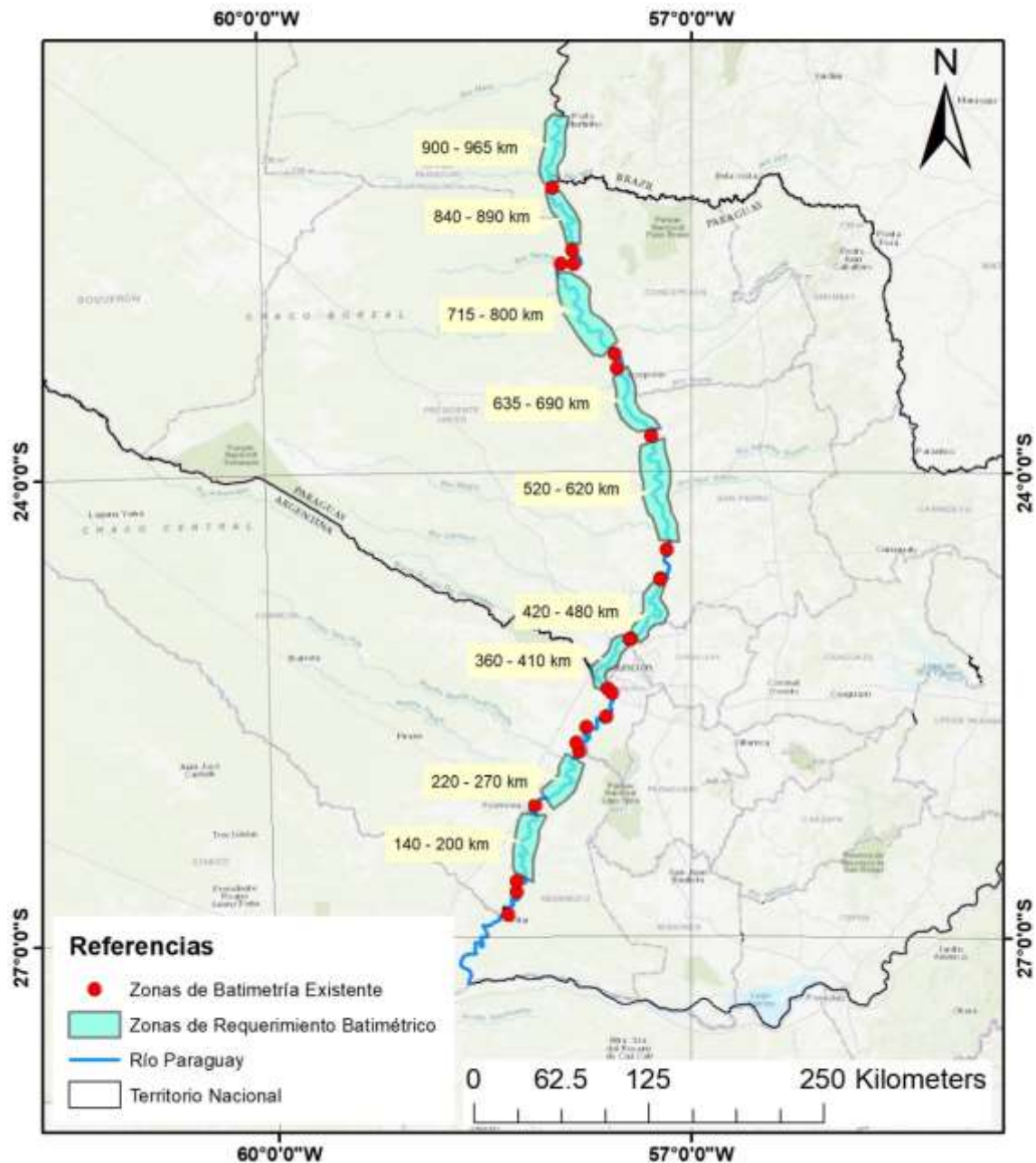


Figura 30 Zonas recomendadas para realizar campañas de batimetría. Obs: progresivas referenciadas respecto al cero del Río Paraguay en confluencia.

Respecto a las planicies de inundación, si bien el MERIT SRTM es un producto mejorado, se podría considerar realizar campañas de relevamiento LiDAR y/o Aerofotogrametría que permita generar topografías más representativas de las planicies de inundación del río.

Finalmente, se considera de suma importancia monitorear los niveles y aportes de los ríos afluentes, de tal manera a calibrar los modelos hidrológicos en base a datos diarios medidos.

REFERENCIAS

- Brunner, G. (2008). *Calibration of Unsteady Flow Models*. NOAA.
- Castellarin, Baldassarre, Bates, & Brath. (2009). Optimal Cross-Sectional Spacing in Preissmann Scheme 1D Hydrodynamic Models. *Journal of Hydraulic Engineering*.
- Chow, V. T. (1994). *Hidráulica de Canales Abiertos*. McGRAW-HILL.
- Fan, F., Pontes, P., Paiva, R., & Collischonn, W. (2014). Avaliação de um método de propagação de cheias em rios com aproximação inercial. *Revista Brasileira de Recursos Hídricos*, 137-147.
- Farr, T., Rosen, P., Caro, E., Crippen, R., Duren, R., Hensley, S., . . . Alsdorf, D. (2007). The Shuttle Radar Topography Mission. *Rev. Geophys.*
- HEC. (2016). *HEC-RAS River Analysis System - Hydraulic Reference Manual*. Davis, California: U.S. Army Corps of Engineers - Hydrologic Engineering Center.
- HEC. (2016). *HEC-RAS River Analysis System - User's Manual*. Davis, California: U.S. Army Corps of Engineers - Institute of Water Resources - Hydrologic Engineering Center.
- Instituto Nacional del Agua - Argentina. (2013). *Estudio de Impacto de Fallas de Yacyretá para el PAE (Plan de Acción frente a Emergencias)*. Ezeiza: Instituto Nacional del Agua.
- Molnar, P. (2011). "Calibration". *Watershed Modelling*. Zürich - Switzerland: Institute of Environmental Engineering, Chair of Hydrology and Water Resources Management.
- Nash, & Sutcliffe. (1970). River Flow Forecasting Through Conceptual Models. *Journal of Hydrology*, 282-290.
- Refsgaard, & Knudsen. (1996). Operational Validation and Intercomparison of Different Types of Hydrological. *Water Resources Research*, 2189-2202.
- Yamazaki, D., Ikeshima, Tawatari, Yamaguchi, O'Loughlin, Neal, . . . Bates. (2017). A high-accuracy map of global terrain elevations. *Geophysical Research Letters*.