UNIVERSIDAD
DE LA REPUBLICA
URUGUAY

FACULTAD DE INGENIERIA

imfia

Modelo hidrodinámico del río Uruguay

Determinación de los principales patrones de flujo y su variación espacio-temporal en función de los forzantes

Rodrigo Ismael Junes Blanco

Programa de Posgrado en Ingeniería (Mecánica de los Fluidos Aplicada)
Facultad de Ingeniería
Universidad de la República

Montevideo – Uruguay
Julio de 2020

UNIVERSIDAD
DE LA REPUBLICA
URUGUAY

FACULTAD DE INGENIERIA

imfia

Modelo hidrodinámico del río Uruguay

Determinación de los principales patrones de flujo y su variación espacio-temporal en función de los forzantes

Rodrigo Ismael Junes Blanco

Tesis de Maestría presentada al Programa de Posgrado en Ingeniería (Mecánica de los Fluidos Aplicada), Facultad de Ingeniería de la Universidad de la República, como parte de los requisitos necesarios para la obtención del título de Magíster en Ingeniería (Mecánica de los Fluidos Aplicada).

Directores:
Dr. Ing. Prof. Sebastián Solari
Dr. Ing. Prof. Mónica Fossati

Montevideo – Uruguay
Julio de 2020

Junes Blanco, Rodrigo Ismael

Modelo hidrodinámico del río Uruguay / Rodrigo Ismael Junes Blanco. - Montevideo: Universidad de la República, Facultad de Ingeniería, 2020.

XI, 443 p.: il.; 29, 7cm.

Directores:

Sebastián Solari

Mónica Fossati

Tesis de Maestría – Universidad de la República, Programa en Ingeniería (Mecánica de los Fluidos Aplicada), 2020.

Referencias bibliográficas: p. 191 – 195.

1. Río Uruguay, 2. modelo numérico, 3. TELEMAC 2D, 4. patrones de flujo. I. Solari, Sebastián, Fossati, Mónica, . II. Universidad de la República, Programa de Posgrado en Ingeniería (Mecánica de los Fluidos Aplicada). III. Título.

INTEGRANTES DEL TRIBUNAL DE DEFENSA DE TESIS

Dr. Ing. Prof. Christian Chreties

Ing. Mag. Prof. Mariano Re

Dr. Ing. Prof. Pablo Santoro

Montevideo – Uruguay
Julio de 2020

Agradecimientos

En primer lugar me gustaría agradecer a mis tutores, Sebastián Solari, quien faltando un mes para que defendiera mi proyecto de grado, me hizo saber de la oportunidad de realizar este posgrado, y me ayudó a inscribirme al programa y obtener eventualmente una beca de la CARU, y Mónica Fossati, cuyos valiosos aportes me ayudaron a lo largo del desarrollo de esta tesis, y que consistentemente llevaron a mejorarla.

Quisiera agradecer a Estudio Ingeniería Ambiental, donde me desarrollo profesionalmente hace más de 7 años, por el apoyo que me han brindado a lo largo de este proceso, y especialmente a Carlos Amorín, por siempre estar dispuesto a apostar en mi capacitación y demostrarlo en los hechos. Mi agradecimiento también va para Ana Perdomo, por las toneladas de información en formato de libros, publicaciones, y anécdotas nacidas de su amplia experiencia con el río Uruguay y el Río de la Plata.

Agradezco también a mis compañeros del IMFIA, con muchos de los cuales transitamos en paralelo el camino de la maestría, compartiendo frustraciones y alegrías, y cuyo apoyo hizo mucho más llevaderas las primeras. Particularmente a mis compañeros de la oficina 236, que tuvieron que sufrir incontables "horas Junes" cuando terminaban su día laboral en facultad y yo comenzaba el mío. Agradezco además a Rodrigo Bayá, con quien compilamos TELEMAC-MASCARET no menos de 10 veces, y solucionamos otros tantos problemas informáticos por el camino.

Agradezco a la Comisión Administradora del Río Uruguay por la beca otorgada durante el primer año de esta tesis, y en particular a Alejandro Nardín, Alejandro Arcelus y Eugenio Lorenzo, por proveerme de información fundamental para el desarrollo de este trabajo.

Finalmente, también se merecen mi gratitud Florencia y mi familia, quienes me acompañaron y apoyaron a lo largo de este proceso. Sin ellos, este trabajo no habría sido posible.

RESUMEN

En esta tesis se estudian los patrones de flujo del río Uruguay entre la represa de Salto Grande y el Río de la Plata y su variación en tiempo y espacio en función de los forzantes del sistema. Se hace una revisión de conceptos necesarios para entender la problemática de la modelación hidrodinámica computacional, así como de los antecedentes de aplicación de esta técnica en el cuerpo de agua en estudio, y en otros con características similares. Se analiza la información disponible de nivel de superficie libre, caudales y velocidades, así como información topobatimétrica del tramo en estudio. Luego se implementa un modelo hidrodinámico bidimensional promediado en la vertical, utilizando el TELEMAC-2D, tomando como condiciones de contorno el ingreso de caudales en Salto Grande, Palmar, Daymán, Gualeguaychú y Paraná Bravo, nivel impuesto en Nueva Palmira, la interacción del viento con la superficie del agua, y el rozamiento con el fondo parametrizado con el coeficiente de Manning. El modelo se calibra utilizando datos del año 2008, para luego validarlo con datos del 2005. Finalmente se simula un período de 7 años entre 2004 y 2010 inclusive. Los campos de velocidad y nivel de superficie libre obtenidos, se analizan para determinar los principales patrones de flujo. Se estudia el campo medio de velocidades, para luego determinar el porcentaje de tiempo de cada dirección de flujo, en base a lo que se concluye que los eventos de inversión de flujo tienen una relevancia no menor en el comportamiento del río, por lo cual se hace una caracterización estadística de los mismos en términos de velocidades, duraciones y propagación aguas arriba, tomando en cuenta las condiciones de contorno de niveles y caudales. Mediante análisis de componentes principales se estudia el campo de velocidades en una zona de interés en las cercanías de Fray Bentos, relacionando las señales de las forzantes con los modos hallados, dándoles significación física. El modelo permite una comprensión más profunda de la hidrodinámica del río Uruguay, conformando una base para futuras líneas de investigación así como herramientas de evaluación y gestión. Abre la posibilidad de hacer foco en zonas de interés para modelación más detallada, permitiendo estudiar fenómenos como transporte de sedimentos, oleaje por viento local, erosión, o dispersión de contaminantes, teniendo en cuenta la variabilidad de la dinámica global del sistema.

Palabras claves:
Río Uruguay, modelo numérico, TELEMAC 2D, patrones de flujo.

ABSTRACT

This thesis focuses on the analysis of Uruguay river flow patterns and its spatial and temporal variation due to the forcings acting on the system, on its reach between Salto Grande dam and Río de la Plata estuary. The necessary concepts for understanding hydrodynamic computational modeling are revised, as well as background information regarding previous studies on the implementation of this technique on the Uruguay river, and other similar bodies of water. Free surface level and discharge data are processed and analyzed, as well as topographic, bathymetric and velocity information. A two-dimensional vertically averaged hydrodynamic model is implemented using TELEMAC-2D. The boundary conditions correspond to discharges from Salto Grande and Palmar dams, and Daymán, Gualeguaychú and Paraná Bravo rivers, free surface level from Nueva Palmira, wind-water interaction, and bottom friction using Manning's law. The model is calibrated using data from 2008 and validated with that from 2005. Lastly, a 7 year period from 2004 to 2010 is simulated. The velocity and free surface level fields obtained from the simulation are analyzed in order to determine the main flow patterns. The mean velocity field is studied, and used to determine the fraction of time for each flow direction (downriver and upriver). From this it is gathered that flow reversal events are relevant to the system's behavior, and a statistical characterization of these events is carried out, focusing on velocities, duration and upriver propagation distance, taking into account the discharge and free surface level boundary conditions. Principal component analysis is applied to the velocity field on a zone of particular interest near the city of Fray Bentos, seeking to give physical significance to the modes via studying their relation to the system's forcings. The model allows for a deeper comprehension of the Uruguay river's hydrodynamics, acting as a starting point for further lines of research as well as for assessment and management tools. It opens up the possibility to focus on stretches of river that are of particular interest, allowing for a more detailed modeling of phenomena such as sediment transport, local wind wave generation, erosion, or dispersion of pollutants, taking into consideration the system's global variability and dynamics.

Keywords:
Uruguay river, numerical model, TELEMAC 2D, flow patterns.

Tabla de contenidos

Lista de figuras x

Lista de tablas xi

1 Introducción 1

1.1 Contexto . . . 1
1.2 Antecedentes . . . 2
1.2.1 Modelación numérica del río Uruguay . . . 2
1.2.2 Modelación numérica de grandes ríos . . . 5
1.3 Objetivos . . . 9
1.4 Metodología . . . 9

2 Fundamento teórico 11

2.1 Introducción . . . 11
2.2 Hidrodinámica fluvial computacional . . . 11
2.3 Ecuaciones en tres dimensiones . . . 13
2.3.1 Ecuación de continuidad . . . 13
2.3.2 Ecuación de conservación del momento . . . 13
2.3.3 Ecuaciones de Navier-Stokes . . . 14
2.3.4 Promediación en el tiempo . . . 16
2.3.5 Modelos de cero ecuaciones . . . 18
2.3.6 Modelos de una ecuación . . . 19
2.3.7 Modelos de dos ecuaciones . . . 20
2.4 Ecuaciones en dos dimensiones . . . 22
2.4.1 Hipótesis . . . 23
2.4.2 Ecuación de continuidad . . . 23
2.4.3 Ecuación de conservación del momento . . . 23
2.5 Métodos numéricos de resolución . . . 26
2.5.1 Conceptos generales . . . 26

2.5.2 Discretización 27

3 Análisis de información de base **30**
3.1 Niveles 30
3.2 Caudales 35
3.3 Velocidades 37

4 Implementación del modelo **49**
4.1 TELEMAC-2D 49
4.2 Modelo de terreno 50
4.3 Grilla de cálculo 53
4.4 Condiciones de borde e iniciales 53

5 Calibración y validación del modelo **61**
5.1 Metodología 61
5.2 Calibración de niveles 66
5.3 Validación de niveles 82
5.4 Validación de velocidades 91
5.5 Síntesis 103

6 Determinación de los principales patrones de flujo **105**
6.1 Introducción 105
6.2 Campo de velocidades promedio 106
6.3 Sentido de flujo 137
6.4 Propagación de ondas aguas arriba 145
6.5 Análisis de patrones de flujo en la zona de Fray Bentos 167
6.6 Síntesis 181

7 Conclusiones **185**

Referencias bibliográficas **191**

Apéndices **196**
Apéndice 1 Procesamiento de datos de nivel 197
Apéndice 2 Procesamiento de datos de caudal. 318
Apéndice 3 Procesamiento de datos de velocidad 333
Apéndice 4 Calibración de niveles 349
Apéndice 5 Análisis de calidad de simulaciones 395

Lista de figuras

Lista de tablas

Capítulo 1

Introducción

1.1. Contexto

Como se describe en Paoli and Schreider (2000), dentro de la Cuenca del Plata, el río Uruguay conforma el segundo sistema fluvial en términos de importancia, teniendo una longitud aproximada de unos 1.600 km. Sus nacientes se encuentran en territorio brasileño, más específicamente en Serra Geral, a unos 1.800 m de altura, tramo en el cual se denomina río Pelotas. Hasta las nacientes del Peperi-Guaçú, el río se desenvuelve en alturas superiores a los 850 m, para luego pasar a discurrir por el límite entre Argentina y Brasil. Posteriormente, el río se estrecha en el salto Grande de Misiones, pasando de los 450 m de ancho a los 20 m. Entre sus afluentes más importantes se cuentan el Ijuí, el Ibicuí y el Quaraí (el cual discurre por el límite entre Brasil y Uruguay). Ya en territorio uruguayo, el principal afluente del río Uruguay es el río Negro, el cual se extiende por aproximadamente 500 km. Finalmente, el río Uruguay vuelca sus aguas en el Río de la Plata.

A consecuencia de su extensión, y en función de la variabilidad que presenta tanto en términos de su geología como de su geomorfología, la cuenca del río Uruguay se puede dividir en tres tramos: el superior, el medio y el inferior (Iriondo and Kröhling, 2008). El tramo superior se encuentra en la región Sur de Brasil, mientras que el tramo medio es el que discurre por la frontera entre Argentina y Brasil, siendo el tramo inferior el situado en el límite entre Uruguay y Argentina (Matteucci, 2012). Desde el punto de vista hidrodinámico la represa de Salto Grande claramente divide al río Uruguay, ya que la misma embalsa el cauce y regula el caudal hacia aguas abajo.

El tramo inferior del río Uruguay reviste importancia para Argentina y Uruguay desde el punto de vista económico, social y ambiental. Entre Salto Grande y el Río de la Plata existen cinco ciudades sobre la margen argentina y nueve sobre la uruguaya, con una población total del orden de los 600.000 habitantes, los cuales hacen uso del río para la obtención de agua para potabilización, vertido de efluentes y recreación, contando seis tomas de agua y alrededor de

tres decenas de vertidos puntuales de efluentes, tanto industriales como domésticos en la margen uruguaya (DINAMA, 2020). Asimismo, cuenta con puertos comerciales y deportivos, públicos y privados, de distinta escala en varias de estas ciudades, siendo los más relevantes Nueva Palmira, Fray Bentos, Paysandú y Concepción del Uruguay, con un movimiento de cargas del orden de los 3 a 4 millones de toneladas al año (ANP, 2020; Puertos, Vías Navegables y Marina Mercante, 2020). La actividad portuaria y de transporte fluvial de cargas implica la realización de dragados de apertura y mantenimiento en el canal de navegación del río, habiéndose ejecutado entre 2017 y 2018 el Proyecto de Dragado y Balizamiento del Río Uruguay, entre el Río de la Plata y el puerto de Paysandú, con el objetivo de descentralizar y regular la actividad portuaria (CARU, 2020).

La gestión de dicho cuerpo de agua debe basarse en información certera y un cabal entendimiento de la dinámica del sistema, y por tanto conocer las características principales del flujo es relevante para casi la totalidad de las actividades anteriormente descritas. Un estudio de la hidrodinámica del río mediante la implementación de un modelo numérico computacional constituye entonces una valiosa herramienta de gestión, siendo la base para la modelación de transporte de sedimentos, evolución morfológica, dispersión de contaminantes y calidad de aguas, entre otras.

1.2. Antecedentes

1.2.1. Modelación numérica del río Uruguay

La hidrodinámica del río Uruguay entre Salto Grande y su desembocadura en el Río de la Plata ha sido motivo de estudio a lo largo de los años por investigadores de ambas orillas. La modelación numérica ha sido una herramienta ampliamente utilizada en estos estudios, incluso desde las épocas más tempranas de su implementación en el ámbito regional.

En este sentido, el primer trabajo de modelación numérica del río Uruguay identificado corresponde al realizado por Mechoso (1975). En este, se aplicaron las ecuaciones de Saint-Venant en su forma unidimensional, utilizando un esquema numérico de diferencias finitas para su resolución. La calibración del modelo se hizo considerando las curvas de remanso medidas en campo, las cuales se utilizaron para determinar el factor de disipación tomado como parámetro de calibración. El modelo se aplicó para seguir la evolución de una onda de descarga desde la represa de Salto Grande, a lo largo del río. Los resultados obtenidos fueron comparados con los de la modelación física del mismo fenómeno, observándose una concordancia satisfactoria.

Sobre finales de la década de 1990, a través de las competencias de la Comisión Administradora del Río Uruguay (CARU), se conformó un grupo técnico binacional, con el objetivo de implementar un modelo hidrodinámico unidimensional del río Uruguay desde la represa de

Salto Grande hasta el Río de la Plata, para utilizarlo como base para estudios morfológicos de pasos de navegación (Larenze et al., 1998). El modelo generado en base a 19 secciones transversales, fue forzado en su frontera aguas arriba con datos horarios de caudal, obtenidos de una curva altura-caudal calibrada para la ciudad de Concordia, Argentina, y en su frontera aguas abajo con datos de nivel en Nueva Palmira, contando en este caso con 3 datos por día. El modelo fue posteriormente utilizado para evaluar la variación de caudales en los brazos de la isla Almirón, considerando una operación de dragado en el canal Casablanca, obteniendo variaciones inferiores al 2,4 % respecto a la situación sin dragado.

En la misma línea que el caso anterior, el Instituto de Mecánica de los Fluidos e Ingeniería Ambiental (IMFIA), desarrolló un modelo hidrosedimentológico unidimensional, en primera instancia para el tramo desde la represa de Salto Grande hasta la ciudad de Fray Bentos (Lorenzo et al., 1998). El modelo fue implementado en el software MIKE 11, utilizando como insumo para la definición de la batimetría los levantamientos realizados por la Dirección Nacional de Construcciones Portuarias de la República Argentina. La calibración se hizo tomando como parámetro el coeficiente de rugosidad, utilizando como forzante el caudal erogado por la represa de Salto Grande en la frontera aguas arriba y el nivel medido en la ciudad de Fray Bentos en la frontera aguas abajo para el primer semestre de 1997, y comparando los resultados contra niveles medidos en las estaciones de Salto, Concordia, Colón, Paysandú, Concepción del Uruguay y Nuevo Berlín. La validación se realizó comparando niveles modelados y medidos para las mismas estaciones, con datos del segundo semestre de 1997, logrando una buena aproximación.

Ya en el año 2004, el Grupo de Estudio de la Contaminación del Río Uruguay (GECRU) de la Universidad Tecnológica Nacional - Regional Concepción del Uruguay (UTN-FRCU), implementó un modelo hidrodinámico bidimensional del río Uruguay entre Colón y Concepción del Uruguay, utilizando el software RMA2 (Cardini et al., 2004). Como parámetro de calibración para el módulo hidrodinámico del modelo, se utilizó el coeficiente de rugosidad de Manning, buscando obtener una solución numéricamente estable y con velocidades modeladas similares a las medidas en campo mediante la utilización de flotadores en distintas condiciones hidrodinámicas.

En el marco del Proyecto PDT S/C/OP/70/01 Modelo Pre-Operacional del Río de la Plata - Río Uruguay (Piedra-Cueva et al., 2008), el IMFIA implementó un modelo hidrodinámico bidimensional en el software RMA-10, que abarcaba el río Uruguay desde Fray Bentos hasta su desembocadura en el Río de la Plata, incluyendo además el delta del río Paraná (en menor nivel de detalle), y la parte alta del Río de la Plata desde sus nacientes hasta la línea recta que una la ciudad de Colonia con la de Buenos Aires. La batimetría utilizada fue generada en base a información cartográfica procedente de las cartas náuticas del Servicio de Oceanografía, Hidrografía y Meteorología de la Armada (SOHMA), para el río Uruguay y el Río de la Plata. Como condiciones de contorno aguas arriba se impusieron los caudales fluviales que ingresan

por el río Uruguay, río Negro y río Paraná, contando con datos diarios para el año 2004, excepto para el río Negro, al cual se le impuso un valor constante de 1.000 m^3/s. Aguas abajo, se impusieron los niveles medidos en las estaciones de Buenos Aires y Colonia. Se realizó un proceso de calibración del modelo, utilizando como parámetro la rugosidad de Manning, con datos de enero y febrero de 2004, haciendo la validación con datos de marzo y abril de mismo año. En ambos casos, la calidad de la simulación se evaluó comparando datos de nivel simulados con los datos medidos en las estaciones de Carmelo, Nueva Palmira y Fray Bentos, contando con datos cada 1 hora para la primera, y cada 15 minutos para las últimas. En base a la calibración se adoptó un número de Manning igual a 0,028, obteniendo resultados satisfactorios en la validación, observando que se subestiman niveles en varios instantes de tiempo.

Continuando en la línea de modelos bidimensionales integrados en vertical establecida anteriormente en el IMFIA, Casterá (2015), en el marco de su tesis de Maestría en Ingeniería Ambiental, implementó un modelo del río Uruguay desde Salto Grande hasta Nueva Palmira, utilizando el software MOHID, con especial énfasis en el ajuste de la zona aledaña a la planta Orión de UPM ubicada al Norte de la ciudad de Fray Bentos. La batimetría utilizada en el modelo se obtuvo del procesamiento de distintas fuentes de información, como el Atlas del Río Uruguay, elaborado por el SOHMA, información de relevamientos en un tramo de 30 km en las inmediaciones de Fray Bentos realizados también por el SOHMA, información del Servicio de Hidrografía Naval de Argentina (SHN) y relevamientos sobre el canal de navegación efectuados por la Dirección Nacional de Vías Navegables del mismo país (DNVN). Como forzantes del modelo se incorporaron el caudal erogado por la represa de Salto Grande, en la frontera aguas arriba, y el nivel medido en Nueva Palmira, en la frontera aguas abajo. Eventualmente se incorporaron los caudales del río Gualeguaychú y de río Negro para analizar su influencia. La calibración del modelo se hizo comparando los niveles simulados con los medidos en la estación de Fray Bentos, principalmente, complementando con los de las estaciones de Paysandú y Boca Gualeguaychú. El parámetro de calibración utilizado fue la longitud de rugosidad (k), obteniendo la mejor correlación entre niveles medidos y simulados para un valor de $k = 0,002$ m. Posteriormente se realizó una validación de la configuración adoptada, comparando con datos de nivel medidos en setiembre, octubre y noviembre de 2010 para caudales bajos, y junio y julio de 2008 para caudales medios. Se logró que el modelo reprodujera adecuadamente las situaciones de caudales bajos y medios en la zona de Fray Bentos; no así la de caudales altos, los cuales no fueron objeto de validación. Las simulaciones realizadas permitieron identificar la existencia de fenómenos de inversión de flujo parcial y total en la sección, principalmente ante situaciones de caudales bajos y medios debido a la influencia de la marea que actúa sobre el Río de la Plata, que pueden extenderse por más de 200 km, alcanzando Paysandú.

Se tiene entonces que a lo largo de casi cinco décadas se ha abordado el problema de la simulación numérica del comportamiento hidrodinámico del río Uruguay entre Salto Grande y su

desembocadura en el Río de la Plata, desde aproximaciones más simples para casos particulares con modelos unidimensionales (Mechoso, 1975), para luego crecer en complejidad, llegando hasta modelos bidimensionales promediados en vertical, que incorporan de manera primaria la forzante del viento, inclusive (Casterá, 2015).

Los modelos implementados que han pasado por un proceso de calibración, utilizaron como parámetro el rozamiento con el fondo, ya sea en términos del coeficiente de Manning (Lorenzo et al., 1998; Cardini et al., 2004; Piedra-Cueva et al., 2008), o la longitud de rugosidad (Casterá, 2015), comparando los niveles simulados contra los niveles medidos en distintas estaciones del río, de acuerdo al dominio de cálculo y la disponibilidad de datos.

Casterá (2015), basada en un análisis de sensibilidad y del comportamiento hidrodinámico del río, identifica la importancia del viento como forzante, especialmente en eventos intensos provenientes del Sur, en el tramo del río Uruguay desde Fray Bentos hasta el Río de la Plata, en escenarios de caudal bajo. La autora también analiza la sensibilidad del comportamiento del modelo respecto a la incorporación de caudales constantes de aporte del río Negro y el río Gualeguaychú (por separado) teniendo que; para el río Negro, la sensibilidad en términos de niveles es del orden de unos pocos centímetros, pudiendo atenuar o eliminar algunos eventos de inversión de flujo instantánea; mientras que para el Gualeguaychú, la influencia sobre la hidrodinámica del río Uruguay, incluso en las cercanías de Ñandubaysal, es muy limitada y prácticamente despreciable.

Hasta el momento no se han realizado trabajos que incorporen cabalmente los caudales de aporte de las principales cuencas del río Uruguay aguas abajo de Salto Grande (Daymán, Queguay, Gualeguaychú y río Negro), considerando su variación temporal. Tampoco se han implementado modelos que incorporen la variación tanto espacial como temporal del viento, que se identifica como una variable relevante para el comportamiento del río en su tramo de mayor ancho en momentos de caudales bajos. En esta revisión tampoco se identificaron trabajos que hayan realizado simulaciones de largo alcance temporal que permitan representar distintas combinaciones de forzantes. Estas cuestiones son abarcadas en el marco de la presente tesis, apoyándose para la primera en el trabajo realizado por Erasun (2018) para la modelación hidrológica de subcuencas del río Uruguay aguas abajo de Salto Grande, en el marco de una beca de tesis de grado otorgada por la CARU; para la segunda en la utilización de datos de reanálisis del CFSR (Saha et al., 2010); y para la última en una simulación abarcando 7 años.

1.2.2. Modelación numérica de grandes ríos

Más allá de los casos de estudio específicos sobre el río Uruguay, tanto a nivel local como regional y mundial se ha incursionado en la modelación hidrodinámica de cursos de agua de grandes dimensiones y caudales, con condiciones similares a las del caso de estudio de esta tesis.

Estos modelos han sido implementados utilizando herramientas computacionales variadas, entre ellas el TELEMAC (Hervouet, 2007). Es pertinente hacer una revisión de estos casos, con foco en las implementaciones bidimensionales promediadas en la vertical, de modo de relevar los distintos enfoques utilizados al momento de implementar, calibrar y validar los modelos.

En términos de la experiencia regional en el Instituto Nacional del Agua de Argentina, para el río Paraná, Jaime and Menéndez (1997), implementaron, calibraron y validaron un modelo hidrodinámico unidimensional, desde la represa de Yacyretá hasta la ciudad de Paraná. Para la calibración utilizaron datos de nivel del período entre marzo de 1996 a marzo de 1997, variando el coeficiente de rugosidad de Manning en el espacio (esto es, distintos valores para distintas progresivas del río), obteniendo valores de entre 0,022 y 0,034 para el cauce, y de 0,80 para las planicies de inundación. La validación se hizo comparando con datos de nivel medidos entre octubre de 1994 a diciembre de 1995. Re et al. (2015) desarrollaron un modelo hidrodinámico unidimensional del delta de este mismo río, en base a trabajos previos de Sabarots et al. (2012) y Bombardelli et al. (1995), abarcando 320 km desde la ciudad de Paraná hasta el Río de la Plata. El sistema es forzado mediante una condición de nivel impuesta aguas arriba, relacionada al caudal del río Paraná Medio, y una condición de nivel aguas abajo, en el frente del Delta del Paraná. Se utilizó el coeficiente de Manning como principal parámetro de calibración del modelo, la cual se hizo mediante la comparación de niveles medidos y simulados utilizando como indicadores el error cuadrático medio y el indicador de eficiencia de Nash-Sutcliffe. La validación del modelo se hizo comparando tanto niveles como caudales. Los resultados de este modelo se utilizaron para hacer una descripción estadística de los niveles en las tres secciones del Delta del Paraná.

En esfuerzos más recientes, Peruzzo et al. (2018) implementaron un modelo bidimensional promediado en vertical para el río Paraná inferior entre el km 410 y el km 452, en las cercanías de la ciudad de Rosario, Argentina. Para esta implementación se utilizó el modelo TELEMAC-2D. La calibración del modelo se hizo utilizando como parámetro el coeficiente de rugosidad de Manning, comparando los valores de niveles de superficie libre simulados con los valores medidos en los hidrómetros de Rosario y Puerto San Martín. Se realizaron para esto simulaciones estacionarias, con caudal constante a la entrada del modelo y nivel constante a la salida, variando el caudal entre 11.640 m^3/s y 28.600 m^3/s, y simulaciones no estacionarias con datos de caudal entrante registrados para los períodos del 01/01/2004 al 31/12/2004 y del 16/03/2015 al 15/03/2016, utilizando para la condición de contorno aguas abajo un nivel impuesto proveniente de la relación altura-caudal. La calibración con mejor ajuste correspondió a un valor de coeficiente de rugosidad de Manning de 0,025 para el primer período y 0,023 para el segundo.

A nivel internacional, para ríos con caudales medios similares al del río Uruguay, se identifica el trabajo realizado por el U.S. Geological Survey (USGS) en la calibración y validación

de un modelo hidrodinámico bidimensional del río Ohio (Wagner and Mueller, 2001). Este modelo fue implementado con el software RMA-2, para un tramo de unos 74 km, separando el dominio de cálculo en dos tramos a causa de la presencia de la presa y exclusas McAlpine. El modelo fue calibrado para una situación de caudal bajo, de alrededor de 990 m^3/s, para posteriormente ser validado en situación de caudal alto, de unos 11.000 m^3/s. Esta calibración se realizó comparando con niveles medidos de superficie libre en 10 estaciones y perfiles de velocidad en 30 secciones, obteniendo resultados que se entendieron representativos de situaciones de caudal estacionario por debajo de los 11.330 m^3/s. El parámetro de calibración utilizado fue el coeficiente de rugosidad de Manning, el cual se varió de manera iterativa hasta obtener el mejor ajuste a los datos medidos, para un valor de 0,024 en todo el dominio, excepto para los elementos de las laterales, a los cuales se asignó un valor de 0,035. Para la situación de caudal alto, se verificó que el efecto de truncar las márgenes del canal (esto es, a partir de cierto nivel de terreno, considerar que la margen se extiende como una pared vertical, no tomando en cuenta la planicie de inundación más allá de ese punto) es despreciable a los efectos de los resultados del modelo. El modelo representó adecuadamente los perfiles de velocidad promediados en vertical para la condición de caudal bajo, con diferencias promedio del orden de 0,03 m/s. Para la condición de caudal alto se observó que el modelo sobrestimó de manera consistente los valores de velocidad medidos, más allá de la adecuada representación de los valores de nivel de superficie libre. Esta diferencia se atribuyó al hecho que el modelo cuenta con un fondo fijo, mientras que el río ajusta su fondo en respuesta al incremento del caudal pasante y aumento de las velocidades en la sección.

Waichler et al. (2005) implementaron un modelo unidimensional del río Columbia desde la presa Priest Rapids hasta la presa McNary, utilizando el software de modelación hidrodinámica unidimensional MASS1, para obtener valores de nivel de superficie libre, flujo volumétrico y velocidad media desde 1940 hasta 2004, en 161 puntos del río. La calibración del modelo se hizo utilizando datos de nivel de superficie libre registrados en seis estaciones entre 1991 y 2004. Como parámetro de calibración de utilizó el coeficiente de rugosidad de Manning, el cual fue ajustado mediante un algoritmo genético automatizado y el método del gradiente, obteniendo resultados con un error medio de 1 mm y una eficiencia del modelo de 0,988. También en el río Columbia, en particular en su zona de estuario, con 40 km de largo por 5 a 10 km de ancho, Sandbach et al. (2018), implementaron tanto un modelo bidimensional promediado en vertical como uno tridimensional utilizando el modelo numérico Delft3D. Como forzantes se utilizó aguas arriba el caudal pasante, aguas abajo el nivel de superficie libre medido en el mareógrafo de Hammond, y datos de viento provenientes de mediciones de la NOAA. Como parámetro de calibración se utilizó el coeficiente de rugosidad de Chezy, considerando un valor uniforme para la zona fluvial, otro para la zona de estuario, y una variación lineal en la transición entre éstas. Posteriormente se analizó, con simulaciones de situaciones no estaciona-

rias de 1 mes de duración, la respuesta frente a la variación de la viscosidad de fondo horizontal. La calibración hizo comparando los valores medios de diferencia de amplitud de marea medida y simulada, y diferencia de valor medio de nivel de superficie libre medida y simulada, buscando la combinación de coeficientes de rozamiento que hiciera que ambos valores fueran simultáneamente cero. La validación del modelo se hizo comparando con datos de salinidad y de flujo, obteniendo buenos resultados en la representación del nivel de superficie libre y patrones de flujo.

De esta breve revisión se tiene que se han utilizado variedad de modelos numéricos (TELEMAC-MASCARET, MOHID, RMA, MASS1, HIDROBID II, Delft3D y HEC-RAS) al momento de resolver la hidrodinámica de cursos de agua de características similares al río Uruguay. En todos ellos se ha utilizado en la calibración alguna parametrización del rozamiento con el fondo, principalmente el coeficiente de rugosidad de Manning (Jaime and Menéndez, 1997; Peruzzo et al., 2018; Wagner and Mueller, 2001; Waichler et al., 2005; Re et al., 2015), pudiendo ser este constante en el dominio, o variable de acuerdo a la morfología de las distintas áreas del cuerpo de agua que se buscaba representar. En el trabajo de Sandbach et al. (2018) se ha incorporado una parametrización de la interacción entre el viento y la superficie, la cual fue objeto de calibración o ajuste. En la amplia mayoría de los casos la calibración se realizó comparando datos de nivel de superficie libre simulados con registros de estaciones de medición dentro del área de estudio (Jaime and Menéndez, 1999, 1997; Peruzzo et al., 2018; Wagner and Mueller, 2001; Waichler et al., 2005; Sandbach et al., 2018; Re et al., 2015), mientras que en algunos de ellos se incluyó además la comparación de velocidades medidas y simuladas en términos de perfiles transversales al cauce (Wagner and Mueller, 2001), así como también la comparación de caudales (Re et al., 2015). Cabe destacar que de acuerdo a las observaciones realizadas por Wagner and Mueller (2001), un buen ajuste del modelo respecto a la precisión al momento de representar el nivel de superficie libre no garantiza una correcta representación del perfil de velocidades, lo cual se podría atribuir a que los autores realizaron la calibración del modelo en situación de caudales bajos, para posteriormente validar con caudales altos, donde observaron las diferencias entre los perfiles de velocidad.

Por tanto, el modelo hidrodinámico objeto de la presente tesis es calibrado y validado con una metodología y enfoque ampliamente aplicados y aceptados, que han permitido, en varias aplicaciones en cuerpos de agua con condiciones similares, llegar a resultados tanto cualitativa como cuantitativamente adecuados para la representación del comportamiento hidrodinámico de los mismos.

1.3. Objetivos

El objetivo general de la tesis es determinar los principales patrones de flujo del río Uruguay y su variabilidad según los forzantes, en base al desarrollo y puesta en funcionamiento de un modelo numérico bidimensional desde Salto Grande hasta el Río de la Plata.

Como objetivos específicos se busca estudiar el estado del arte en modelación numérica y computacional de flujos a superficie libre e hidrodinámica de ríos; recopilar y analizar antecedentes de modelación numérica e información de base sobre la dinámica del río Uruguay; implementar un modelo hidrodinámico bidimensional para el río Uruguay entre la represa de Salto Grande y el Río de la Plata; calibrar y validar dicho modelo; y determinar los principales patrones de flujo y su variación espacial y temporal en función de los forzantes, utilizando los resultados de la modelación.

1.4. Metodología

En esta sección se desarrolla la estrategia metodológica global implementada para la realización del presente trabajo de tesis.

Como primer paso se analizan los antecedentes relacionados a modelación numérica del río Uruguay, así como de cursos fluviales con características similares en términos de caudal y morfología (sección 1.2). Posteriormente, se hace una revisión de los conceptos teóricos relevantes para comprender la temática de la modelación hidrodinámica de cursos fluviales (capítulo 2).

Luego de ello, se analiza la información de base disponible, asociada a series temporales de medición de nivel de superficie libre en 13 estaciones a lo largo del tramo de interés, series temporales de caudales que ingresan al sistema, y campañas de medición de perfiles de velocidad mediante perfilador de corriente acústico Doppler, en adelante ADCP por sus siglas en inglés (capítulo 3).

El paso siguiente corresponde a la implementación del modelo numérico (capítulo 4), para lo que se utiliza el software TELEMAC-2D, de la suite numérica libre y abierta TELEMAC-MASCARET, que resuelve las ecuaciones de flujo a superficie libre promediado en la vertical, conocidas como ecuaciones de Saint-Venant. En primera instancia es necesario generar un modelo de terreno en base a información batimétrica y topográfica. Se desarrolla asimismo una grilla de cálculo no estructurada, de elementos triangulares, en base a sub-grillas por tramos, las cuales se añaden secuencialmente hasta obtener el resultado final. Se generan luego las condiciones de borde necesarias para la ejecución del modelo, las cuales corresponden a caudales que ingresan al sistema por Salto Grande y los ríos Daymán, Gualeguaychú, Negro y Paraná Bravo, niveles de superficie libre en Nueva Palmira, y campo de viento a 10 m de altura. Se incluye la fricción de fondo en términos de la Ley de Manning.

Una vez implementado el modelo se procede a su calibración y validación (capítulo 5). La calibración se hace en base a la comparación de series de nivel medidas y simuladas en 13 estaciones hidrométricas a lo largo del río, utilizando como parámetros de calibración el coeficiente de fricción de fondo de Manning y el de influencia del viento. Se establecen criterios de comparación que permiten seleccionar la combinación de coeficientes que entregue el mejor resultado. Una vez obtenidos, se procede a la validación, la cual aplica la misma metodología, agregando una comparación cualitativa de las velocidades obtenidas del modelo con los datos medidos por ADCP.

Con el modelo calibrado y validado, se pasa a la determinación de los principales patrones de flujo del río (capítulo 6), para lo cual se realiza una simulación de 7 años, desde 2004 a 2010 inclusive. En base a los datos de esta simulación, se calcula y analiza el campo de velocidades promedio, para luego determinar el porcentaje de tiempo de permanencia del flujo en sentido aguas abajo y aguas arriba. Posteriormente se analiza la propagación aguas arriba de las ondas asociadas a eventos de inversión de flujo en términos de los frentes de velocidad negativa, para lo cual se consideran los datos extraídos de puntos situados sobre el eje del río cada 1 km. En base a estos datos se hace una caracterización global del flujo hacia aguas arriba, así como una caracterización basada en los eventos individuales identificados. Por último se estudian los patrones de flujo característicos de la zona alrededor de la ciudad de Fray Bentos y la bahía donde desemboca el Gualeguaychú, mediante análisis de componentes principales, relacionando los resultados obtenidos con las forzantes del sistema, para darles una interpretación física.

Finalmente se presentan las conclusiones extraídas del proceso y se discuten los resultados obtenidos, dando además un cierre global y perspectivas a futuro 7.

Capítulo 2

Fundamento teórico

2.1. Introducción

En este capítulo se realiza una revisión del estado del arte en el tema de estudio, de modo de establecer el contexto del trabajo. La estructura de esta revisión va de lo general a lo particular en el área de trabajo, partiendo de las ecuaciones fundamentales de Navier-Stokes, y agregando hipótesis simplificadoras hasta llegar a las ecuaciones de Saint-Venant, para luego hacer una revisión somera de métodos numéricos de resolución de las mismas.

2.2. Hidrodinámica fluvial computacional

El flujo en ríos y el transporte de sedimentos es un problema complejo para el cual es dificultoso hallar soluciones analíticas. Históricamente, esto ha significado que la investigación de estos problemas necesitaba el desarrollo de modelos físicos a escala o estudios de campo, con sus ventajas y desventajas. En las últimas décadas, el desarrollo de las computadoras ha permitido la implementación de la simulación numérica computacional como herramienta ampliamente utilizada para la resolución de estos problemas. La calidad de los resultados obtenidos mediante simulación computacional depende de varios factores, entre ellos: la correcta descripción matemática de los fenómenos físicos en juego, en términos de ecuaciones que gobiernan al sistema y las condiciones de contorno del mismo; la adecuada discretización de estas ecuaciones diferenciales; la efectividad de los esquemas numéricos utilizados en la resolución de las ecuaciones; y la adecuada programación e implementación del código computacional. Asimismo, más allá de asegurar que se cumplan los factores anteriores, los modelos computacionales deben ser calibrados y validados con información real medida en campo en el sistema de interés (Wu, 2008).

La implementación de un modelo numérico implica 5 pasos fundamentales (Wu, 2008):

1. Preparación de los datos: se debe analizar los datos disponibles para los procesos físicos bajo estudio, determinar las condiciones iniciales y de contorno a utilizar en el modelo, realizar estimaciones de los parámetros del modelo y finalmente realizar la calibración del mismo.
2. Estimación de los parámetros del modelo: los parámetros numéricos del modelo (discretización temporal y espacial, etc.) se deben determinar en función de la precisión que se busca en la solución a obtener y en la estabilidad de los esquemas numéricos de resolución utilizados. Por su parte, los parámetros físicos pueden dividirse en dos categorías, las propiedades físicas que pueden ser medidas (densidad, viscosidad, tamaño de partícula, etc.), y los que surgen de la conceptualización de los fenómenos físicos que se dan en el sistema (rugosidad de fondo, interacción viento-superficie, etc.). Este último grupo de parámetros se calibra utilizando datos medidos directamente en el sistema a modelar.
3. Calibración y validación del modelo: según lo expresado en el punto anterior, el modelo debe calibrarse ajustando los parámetros del mismo en base a datos de campo medidos en el sistema a modelar. Se debe realizar una validación del modelo, utilizando series de datos distintas a las utilizadas durante la calibración, de modo de verificar que los parámetros calibrados permitan representar correctamente los fenómenos físicos que se dan en el sistema en estudio.
4. Interpretación de las simulaciones: los resultados obtenidos deben ser interpretados a la luz del conocimiento previo sobre el sistema en estudio.
5. Análisis de incertidumbre: algunas fuentes de incertidumbre incluyen la conceptualización, las condiciones de contorno, los parámetros de calibración y los datos de entrada del modelo.

Los modelos computacionales pueden clasificarse por su "dimensionalidad", esto es en términos de cuantas dimensiones espaciales utilizan para representar el sistema a modelar. Se puede distinguir entre las siguientes categorías:

- Modelos unidimensionales.
- Modelos bidimensionales verticales.
- Modelos bidimensionales horizontales.
- Modelos tridimensionales.

En las secciones a continuación se desarrollan las ecuaciones que rigen el comportamiento hidrodinámico en sistemas fluviales, haciendo especial énfasis en las ecuaciones tridimensionales y bidimensionales integradas en la vertical.

2.3. Ecuaciones en tres dimensiones

Las ecuaciones que rigen el movimiento de fluidos en general, y la hidrodinámica fluvial en particular corresponden a la de conservación de la masa, también conocida como ecuación de continuidad, la de conservación del momento y la de conservación de la energía. A los efectos de la hidrodinámica fluvial, esta última se deja de lado (Hervouet, 2007).

2.3.1. Ecuación de continuidad

La ecuación de continuidad expresa que la masa no puede ser creada ni destruida, sino que se conserva. Para el caso de ríos esto suele llevar a la hipótesis de que el agua se mantiene en fase líquida, y las pérdidas de masa del sistema por cambios de estado son despreciables (Julien, 2018).

La ecuación de continuidad se puede presentar tanto de forma integral como de forma diferencial, estando estas relacionadas a través de los teoremas de Leibnitz y de Gauss, según se desarrolla a continuación (Hervouet, 2007). La conservación de la masa de fluido contenida en un dominio Ω con frontera Γ y normal saliente $\vec{n}$ se puede expresar como:

$$\frac{d}{dt}\int_{\Omega}\rho d\Omega = 0 \tag{2.1}$$

$$\int_{\Omega}\frac{\partial\rho}{\partial t}d\Omega + \int_{\Gamma}\rho\vec{u}.\vec{n}d\Gamma = \int_{\Omega}\left(\frac{\partial\rho}{\partial t} + \nabla.(\rho\vec{u})\right)d\Omega = 0\ \forall\Omega \tag{2.2}$$

Siendo ρ la densidad, $\vec{u}$ el campo vectorial de velocidades y ∇ el operador diferencial

De la forma integral de la conservación de la masa se puede obtener la forma diferencial, asumiendo que la primera es válida en todo dominio Ω, quedando expresada como se muestra en la ecuación 2.3 para el caso de densidad variable, o reducida a la ecuación 2.4 si la densidad se considera constante y uniforme.

$$\frac{\partial\rho}{\partial t} + \nabla.(\rho\vec{u}) = 0 \tag{2.3}$$

$$\nabla.\vec{u} = 0 \tag{2.4}$$

2.3.2. Ecuación de conservación del momento

La conservación del momento en un volumen de fluido expresa el balance entre la fuerza por unidad de volumen ejercida por las tensiones que actúan sobre el mismo, y la variación de la cantidad de movimiento de ese volumen (Julien, 2018). Lo anterior se puede escribir en forma

integral como (Hervouet, 2007):

$$\frac{d}{dt}\int_\Omega \rho\vec{u}d\Omega = \int_\Omega \rho(\vec{g}+\vec{F})d\Omega + \int_\Gamma \boldsymbol{\tau}.\vec{n}d\Gamma \Longrightarrow \tag{2.5}$$

$$\int_\Omega \frac{\partial(\rho\vec{u})}{\partial t}d\Omega + \int_\Gamma (\rho\vec{u})(\vec{u}.\vec{n})d\Gamma = \int_\Omega \rho(\vec{g}+\vec{F})d\Omega + \int_\Omega \nabla.\boldsymbol{\tau}d\Omega \Longrightarrow \tag{2.6}$$

$$\int_\Omega \left[\frac{\partial(\rho\vec{u})}{\partial t} + \nabla.(\rho\vec{u}\otimes\vec{u})\right]d\Omega = \int_\Omega [\rho(\vec{g}+\vec{F}) + \nabla.\boldsymbol{\tau}]d\Omega \tag{2.7}$$

Siendo $\vec{g} = (0, 0, -g)$ la aceleración gravitatoria, $\vec{F} = (F_x, F_y, F_z)$ el resto de las fuerzas de masa actuantes y $\boldsymbol{\tau}$ el tensor de tensiones, donde $\otimes$ denota el producto tensorial. Asumiendo que lo anterior es válido para todo dominio Ω, se obtiene la expresión diferencial de la ecuación de conservación del momento, dada por:

$$\frac{\partial(\rho\vec{u})}{\partial t} + \nabla.(\rho\vec{u}\otimes\vec{u}) = \rho\vec{g} + \rho\vec{F} + \nabla.\boldsymbol{\tau} \tag{2.8}$$

2.3.3. Ecuaciones de Navier-Stokes

Las ecuaciones 2.3 y 2.8 se conocen como la forma conservativa de las ecuaciones de Navier-Stokes (N-S). La descripción del tensor de tensiones $\boldsymbol{\tau}$ se hace considerando que la mezcla de agua y sedimento en bajas concentraciones, esto es, menos de 200 kg/m^3, situación que se da usualmente en cuerpos de agua fluviales, corresponde a un tipo de fluido Newtoniano (Wu, 2008). Separando los efectos de la presión del resto de las tensiones se tiene la siguiente ecuación constitutiva (Hervouet, 2007):

$$\boldsymbol{\tau} = -p\boldsymbol{I} + 2\mu\boldsymbol{D} = -p\boldsymbol{I} + 2\rho\nu\boldsymbol{D} \tag{2.9}$$

$$\boldsymbol{D} = \frac{1}{2}(\nabla(\vec{u}) + \nabla(\vec{u})^T) \tag{2.10}$$

Siendo p la presión, $\boldsymbol{I}$ el tensor identidad, μ la viscosidad dinámica, ν la viscosidad cinemática y $\boldsymbol{D}$ el tensor de tasa de deformación, definido por la ecuación 2.10. Las ecuaciones de N-S se pueden simplificar en el caso de hidrodinámica de ríos considerando que las variaciones en el campo de densidad son suficientemente pequeñas como para asumir que se trata de un fluido incompresible, y también asumiendo que μ es constante y uniforme. De este modo se llega a las ecuaciones en su forma conocida como "no conservativa":

$$\nabla.\vec{u} = 0 \tag{2.11}$$

$$\frac{\partial \vec{u}}{\partial t} + \vec{u}.\nabla(\vec{u}) = -\frac{1}{\rho}\nabla(p) + \nu\nabla^2(\vec{u}) + \vec{g} + \vec{F} \tag{2.12}$$

Las ecuaciones anteriores, expresadas en coordenadas cartesianas son las siguientes:

$$\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} + \frac{\partial w}{\partial z} = 0 \tag{2.13}$$

$$\frac{\partial u}{\partial t} + \vec{u}.\nabla(u) = -\frac{1}{\rho}\frac{\partial p}{\partial x} + \nu\nabla^2(u) + F_x \tag{2.14}$$

$$\frac{\partial v}{\partial t} + \vec{u}.\nabla(v) = -\frac{1}{\rho}\frac{\partial p}{\partial y} + \nu\nabla^2(v) + F_y \tag{2.15}$$

$$\frac{\partial w}{\partial t} + \vec{u}.\nabla(w) = -\frac{1}{\rho}\frac{\partial p}{\partial z} - g + \nu\nabla^2(w) + F_z \tag{2.16}$$

El siguiente paso en la simplificación de estas ecuaciones para su aplicación a la hidrodinámica fluvial consiste en asumir que la componente vertical de la velocidad es despreciable, que la única fuerza de masa que actúa en la vertical corresponde a la gravedad, y que, según se considerara anteriormente, las variaciones en la densidad son pequeñas y esta se puede expresar como $\rho = \rho_0 + \Delta\rho = \rho_0\left(1 + \frac{\Delta\rho}{\rho_0}\right)$, siendo ρ_0 una densidad de referencia y $\Delta\rho$ la variación alrededor de ésta, con lo que la ecuación 2.16 toma la forma de la 2.17, que resolviendo en p queda como se muestra en la ecuación 2.18, siendo z_s la cota de la superficie libre y p_{atm} la presión atmosférica (Hervouet, 2007).

$$\frac{\partial p}{\partial z} = -\rho_0 g\left(1 + \frac{\Delta\rho}{\rho_0}\right) \tag{2.17}$$

$$p = p_{atm} + \rho_0 g(z_s - z) + \rho_0 g\int_z^{z_s}\frac{\Delta\rho}{\rho_0}d\eta \tag{2.18}$$

Esta expresión hallada para la presión se puede sustituir en las ecuaciones 2.14 y 2.15. Para esto, considerando que las variaciones en la densidad son pequeñas, se aproxima la expresión $\frac{1}{\rho} = \frac{1}{\rho_0}\frac{1}{\left(1+\frac{\Delta\rho}{\rho_0}\right)}$ por un desarrollo de Taylor de primer orden alrededor del cero con variable en $\frac{\Delta\rho}{\rho_0}$, teniendo que $\frac{1}{\rho} \approx \frac{1}{\rho_0}\left(1 - \frac{\Delta\rho}{\rho_0}\right)$. Sustituyendo lo anterior y la expresión para la presión mostrada en la ecuación 2.18, despreciando términos de segundo orden, los términos del gradiente de presiones quedan como:

$$-\frac{1}{\rho}\frac{\partial p}{\partial x} \approx -\frac{1}{\rho_0}\left(1-\frac{\Delta\rho}{\rho_0}\right)\frac{\partial p_{atm}}{\partial x} - g\frac{\partial z_s}{\partial x} + g\frac{\Delta\rho}{\rho_0}\frac{\partial z_s}{\partial x} - g\frac{\partial}{\partial x}\left(\int_z^{z_s}\frac{\Delta\rho}{\rho_0}d\eta\right) \tag{2.19}$$

$$-\frac{1}{\rho}\frac{\partial p}{\partial y} \approx -\frac{1}{\rho_0}\left(1-\frac{\Delta\rho}{\rho_0}\right)\frac{\partial p_{atm}}{\partial y} - g\frac{\partial z_s}{\partial y} + g\frac{\Delta\rho}{\rho_0}\frac{\partial z_s}{\partial y} - g\frac{\partial}{\partial y}\left(\int_z^{z_s}\frac{\Delta\rho}{\rho_0}d\eta\right) \tag{2.20}$$

Al sustituir las expresiones 2.19 y 2.20 en las ecuaciones 2.14 y 2.15, se obtiene la siguiente simplificación de las ecuaciones de N-S, que incluye la hipótesis de distribución hidrostática de presiones:

$$\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} + \frac{\partial w}{\partial z} = 0 \tag{2.21}$$

$$\frac{\partial u}{\partial t} + \vec{u}.\nabla(u) = -\frac{1}{\rho_0}\left(1-\frac{\Delta\rho}{\rho_0}\right)\frac{\partial p_{atm}}{\partial x} - g\frac{\partial z_s}{\partial x} + g\frac{\Delta\rho}{\rho_0}\frac{\partial z_s}{\partial x} - g\frac{\partial}{\partial x}\left(\int_z^{z_s}\frac{\Delta\rho}{\rho_0}d\eta\right) + \nu\nabla^2(u) + F_x \tag{2.22}$$

$$\frac{\partial v}{\partial t} + \vec{u}.\nabla(v) = -\frac{1}{\rho_0}\left(1-\frac{\Delta\rho}{\rho_0}\right)\frac{\partial p_{atm}}{\partial y} - g\frac{\partial z_s}{\partial y} + g\frac{\Delta\rho}{\rho_0}\frac{\partial z_s}{\partial y} - g\frac{\partial}{\partial y}\left(\int_z^{z_s}\frac{\Delta\rho}{\rho_0}d\eta\right) + \nu\nabla^2(v) + F_y \tag{2.23}$$

$$p = p_{atm} + \rho_0 g(z_s - z) + \rho_0 g\int_z^{z_s}\frac{\Delta\rho}{\rho_0}d\eta \tag{2.24}$$

Las ecuaciones anteriores consideran pequeñas variaciones en la densidad del agua. Tomando la hipótesis de densidad constante, el sistema de ecuaciones está dado por:

$$\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} + \frac{\partial w}{\partial z} = 0 \tag{2.25}$$

$$\frac{\partial u}{\partial t} + \vec{u}.\nabla(u) = -\frac{1}{\rho}\frac{\partial p_{atm}}{\partial x} - g\frac{\partial z_s}{\partial x} + \nu\nabla^2(u) + F_x \tag{2.26}$$

$$\frac{\partial v}{\partial t} + \vec{u}.\nabla(v) = -\frac{1}{\rho}\frac{\partial p_{atm}}{\partial y} - g\frac{\partial z_s}{\partial y} + \nu\nabla^2(v) + F_y \tag{2.27}$$

$$p = p_{atm} + \rho g(z_s - z) \tag{2.28}$$

2.3.4. Promediación en el tiempo

Cuando el número de Reynolds, definido como $Re = \frac{uL}{\nu}$, siendo u y L una velocidad y una longitud características del flujo bajo estudio, respectivamente, supera un valor de alrededor de 2.000, las cantidades físicas involucradas en las ecuaciones de N-S, como la velocidad y la presión empiezan a mostrar fluctuaciones rápidas en el tiempo y el espacio, cuyas variaciones son impredecibles (Hervouet, 2007).

En la mayoría de los casos, las ecuaciones presentadas anteriormente no pueden resolverse en forma directa. De todos modos, el interés de la hidrodinámica no necesariamente es el de representar en forma exacta las fluctuaciones turbulentas de las cantidades involucradas, sino que interesa conocer las cantidades en términos medios (Wu, 2008). De este modo, una cantidad ϕ se puede expresar como la suma de una componente media, $\bar{\phi}$, y una componente fluctuante, ϕ', con:

$$\phi = \bar{\phi} + \phi' \tag{2.29}$$

$$\bar{\phi} = \frac{1}{T}\int_{t}^{t+T} \phi d\tau \tag{2.30}$$

Siendo t el tiempo y T el período considerado, que debe ser mayor que el de las fluctuaciones turbulentas. Cabe destacar que el promedio de la componente fluctuante es nulo, esto es, $\overline{\phi'} = 0$ (Wu, 2008).

Aplicando la promediación temporal, también conocida como promedio de Reynolds, a las ecuaciones 2.25 a 2.28, se obtienen las ecuaciones de Navier-Stokes promediadas en el tiempo (RANS, por la sigla en inglés de "Reynolds Averaged Navier-Stokes"):

$$\frac{\partial \bar{u}}{\partial x} + \frac{\partial \bar{v}}{\partial y} + \frac{\partial \bar{w}}{\partial z} = 0 \tag{2.31}$$

$$\frac{\partial \rho\bar{u}}{\partial t} + \frac{\partial \rho\bar{u}\bar{u}}{\partial x} + \frac{\partial \rho\bar{u}\bar{v}}{\partial y} + \frac{\partial \rho\bar{u}\bar{w}}{\partial z} + \frac{\partial \rho\overline{u'u'}}{\partial x} + \frac{\partial \rho\overline{u'v'}}{\partial y} + \frac{\partial \rho\overline{u'w'}}{\partial z} = -\frac{\partial p_{atm}}{\partial x} - \rho g\frac{\partial z_s}{\partial x} + \rho\nu\nabla^2(\bar{u}) + \rho F_x \tag{2.32}$$

$$\frac{\partial \rho\bar{v}}{\partial t} + \frac{\partial \rho\bar{v}\bar{u}}{\partial x} + \frac{\partial \rho\bar{v}\bar{v}}{\partial y} + \frac{\partial \rho\bar{v}\bar{w}}{\partial z} + \frac{\partial \rho\overline{v'u'}}{\partial x} + \frac{\partial \rho\overline{v'v'}}{\partial y} + \frac{\partial \rho\overline{v'w'}}{\partial z} = -\frac{\partial p_{atm}}{\partial y} - \rho g\frac{\partial z_s}{\partial y} + \rho\nu\nabla^2(\bar{v}) + \rho F_y \tag{2.33}$$

$$p = p_{atm} + \rho g(z_s - z) \tag{2.34}$$

Los productos cruzados de las componentes fluctuantes de la velocidad, u', v' y w', son los que conforman el tensor de Reynolds, el cual tiene la forma que se muestra en la ecuación 2.35. Físicamente, los elementos del tensor representan el intercambio de momento entre dos porciones de fluido a causa de las fluctuaciones turbulentas en las componentes de la velocidad (Wu, 2008).

$$\boldsymbol{R} = \begin{bmatrix} -\rho\overline{u'u'} & -\rho\overline{u'v'} & -\rho\overline{u'w'} \\ -\rho\overline{u'v'} & -\rho\overline{v'v'} & -\rho\overline{v'w'} \\ -\rho\overline{u'w'} & -\rho\overline{v'w'} & -\rho\overline{w'w'} \end{bmatrix} \tag{2.35}$$

Utilizando la notación tensorial de Einstein y despejando algunos términos, el sistema de ecuaciones de 2.31 a 2.34, puede escribirse como se muestra a continuación:

$$\frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_i} = 0 \tag{2.36}$$

$$\frac{\partial \rho\bar{u}_i}{\partial t} + \frac{\partial \rho\bar{u}_i\bar{u}_j}{\partial x_j} = \frac{\partial p_{atm}}{\partial x_j} - \rho g\frac{\partial z_s}{\partial x_i} + \frac{\partial}{\partial x_j}\left(\frac{\partial \rho\nu\bar{u}_i}{\partial x_j} - \rho\overline{u_i'u_j'}\right) + \rho F_i \tag{2.37}$$

$$p = p_{atm} + \rho g(z_s - x_3) \tag{2.38}$$

La introducción del tensor de Reynolds agrega una nueva incógnita al problema, por lo cual el sistema de ecuaciones anterior, tal como está escrito, es un sistema abierto. Para cerrar el sistema, el tensor de Reynolds se debe expresar en función de los valores promedio de las cantidades involucradas, lo cual se logra con la incorporación de modelos de "cierre de turbulencia" (Hervouet, 2007).

Como primer paso para lograr lo anterior, se utiliza la hipótesis de Boussinesq, la cual asume que, de forma análoga a las tensiones viscosas, las tensiones turbulentas son proporcionales a los gradientes de la velocidad media (Wu, 2008):

$$-\overline{u_i'u_j'} = \nu_t\left(\frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_j} + \frac{\partial \bar{u}_j}{\partial x_i}\right) - \frac{2}{3}k\delta_{ij} \tag{2.39}$$

Con ν_t la viscosidad turbulenta, $k = \overline{u_i'u_i'}/2$ la energía cinética turbulenta, y δ_{ij} la delta de Kronecker.

2.3.5. Modelos de cero ecuaciones

Los modelos de cero ecuaciones, según indica su nombre, no necesitan del cálculo de ecuaciones adicionales, sino que dan una relación algebraica entre la viscosidad turbulenta ν_t y el gradiente de velocidades medias (Capote, 2008), despreciando la energía cinética turbulenta. Estos modelos se basan en asumir una proporcionalidad directa entre ν_t, una escala de velocidades y una escala de longitudes (Wu, 2008). A continuación se presentan algunos de los modelos más relevantes de esta categoría.

Modelo de longitud de mezcla de Prandtl

Este modelo propone que la viscosidad turbulenta queda dada por (Hervouet, 2007):

$$\nu_t = L_m^2 \left(2 D_{ij} D_{ij}\right) \tag{2.40}$$

$$D_{ij} = \frac{1}{2}\left(\frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_j} + \frac{\partial \bar{u}_j}{\partial x_i}\right) \tag{2.41}$$

Siendo D_{ij} la componente (i, j) del tensor de tasa de deformación $\boldsymbol{D}$, y L_m la longitud de mezcla, con $L_m = \kappa z$ para flujos en capa límite, y $L_m = \kappa z\sqrt{(1 - z/h)}$ para flujos a superficie libre, con z la distancia a la pared o fondo del canal, h la profundidad del flujo, y κ la constante de Von Karman ($\kappa = 0,41$ en flujos no estratificados). Este modelo es muy poco usado en flujos rápidamente variados, donde existan recirculaciones o en canales con geometría compleja, dado que en estos casos se hace muy difícil especificar L_m (Wu, 2008).

Modelo de Smagorinski

El modelo de Smagorinski, basado en modelos de longitud de mezcla, tiene significancia únicamente en la modelación numérica, ya que parte de la base que la turbulencia es la solución a las ecuaciones de Navier-Stokes. Lo anterior implica que la turbulencia aparece naturalmente en las soluciones numéricas siempre y cuando el tamaño de los elementos finitos utilizados permita representar la disipación viscosa de los vórtices más pequeños. Este modelo entra en juego cuando el tamaño de los elementos finitos de la malla no permite reproducir vórtices menores a cierto tamaño, los cuales son modelados incluyendo una viscosidad turbulenta a la viscosidad molecular, calculando la primera en base a un modelo de longitud de mezcla dado por (Hervouet, 2007):

$$\nu_t = C_s^2 \Delta^2 \sqrt{2 D_{ij} D_{ij}} \tag{2.42}$$

Donde C_s es un coeficiente adimensional que toma valores entre 0,1 y 0,2, y Δ el tamaño de los elementos de la grilla de cálculo.

2.3.6. Modelos de una ecuación

En los modelos de una ecuación se asume que la viscosidad turbulenta escala con la raíz cuadrada de la energía cinética turbulenta (Wu, 2008), según se muestra en la ecuación 2.43, siendo $c_\mu \approx 0,084$.

$$\nu_t = c_\mu \sqrt{k} L_m \tag{2.43}$$

La energía cinética turbulenta se determina utilizando una ecuación de transporte, que puede derivarse en su forma exacta de las ecuaciones de continuidad y de Navier-Stokes (ver ecuación 2.44). Para darle cierre a la ecuación, se debe expresar los términos de difusión, producción y disipación de la energía cinética turbulenta, obteniendo la ecuación 2.45, donde $P_k = -\overline{u_i' u_j'} \partial \bar{u}_i / \partial x_j$, $\sigma_k \approx 1,0$ y $c_D \approx 0,08/c_\mu$ (Wu, 2008). Sustituyendo las ecuaciones 2.39 y 2.43 en la ecuación 2.45, se obtiene la expresión para la ecuación de transporte para k en términos de las velocidades medias y la longitud de mezcla L_m, que se muestra en la ecuación 2.46.

$$\frac{\partial k}{\partial t} + \frac{\partial (\bar{u}_i k)}{\partial x_i} = -\frac{\partial}{\partial x_i} \left[\overline{u_i' \left(\frac{u_j' u_j'}{2} + \frac{p'}{\rho} \right)} \right] - \overline{u_i' u_j'} \frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_j} - \nu \overline{\frac{\partial u_i'}{\partial x_j} \frac{\partial u_i'}{\partial x_j}} \tag{2.44}$$

$$\frac{\partial k}{\partial t} + \frac{\partial (\bar{u}_i k)}{\partial x_i} = \frac{\partial}{\partial x_i} \left(\frac{\nu_t}{\sigma_k} \frac{\partial k}{\partial x_i} \right) + P_k - c_D \frac{k^{3/2}}{L_m} \tag{2.45}$$

$$\frac{\partial k}{\partial t} + \frac{\bar{u}_i k}{\partial x_i} = \frac{\partial}{\partial x_i} \left[\frac{c_\mu k^{1/2} L_m}{\sigma_k} \frac{\partial k}{\partial x_i} \right] + \left[c_\mu k^{1/2} L_m \left(\frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_j} + \frac{\partial \bar{u}_j}{\partial x_i} \right) - \frac{2}{3} k \delta_{ij} \right] \frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_j} - c_D \frac{k^{3/2}}{L_m} \tag{2.46}$$

Los modelos de una ecuación basados en la energía cinética turbulenta, como el mostrado anteriormente, son incompletos, en el sentido que relacionan la escala de longitud de la turbulencia con una longitud típica del flujo en cuestión. En función de lo anterior, estos modelos son poco usados (Wilcox, 2006).

2.3.7. Modelos de dos ecuaciones

Los modelos de dos ecuaciones para la turbulencia surgen de la dificultad para especificar una longitud de mezcla en flujos complejos. A continuación se presenta brevemente dos de los modelos más usuales de esta categoría.

Modelo $k - \epsilon$

El modelo $k - \epsilon$ busca representar la energía cinética turbulenta (k) y la disipación de la misma (ϵ). Las ecuaciones para representar estas cantidades en tres dimensiones quedan dadas por (Hervouet (2007), Launder (1974)):

$$\frac{\partial k}{\partial t} + \frac{\partial(\bar{u}_i k)}{\partial x_i} = \frac{\partial}{\partial x_i}\left(\frac{\nu_t}{\sigma_k}\frac{\partial k}{\partial x_i}\right) + \nu_t\left(\frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_j} + \frac{\partial \bar{u}_j}{\partial x_i}\right)\frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_j} - \epsilon \tag{2.47}$$

$$\frac{\partial \epsilon}{\partial t} + \frac{\partial(\bar{u}_i \epsilon)}{\partial x_i} = \frac{\partial}{\partial x_i}\left(\frac{\nu_t}{\sigma_\epsilon}\frac{\partial \epsilon}{\partial x_i}\right) + c_{1\epsilon}\frac{\epsilon}{k}\left[P + (1 - c_{3\epsilon})G\right] + c_{2\epsilon}\frac{\epsilon^2}{k} \tag{2.48}$$

Siendo P el término de producción de energía turbulenta y G un término fuente asociado a las fuerzas gravitatorias en caso de existencia de gradientes térmicos. Estos términos quedan dados por (Hervouet, 2007):

$$P = \nu_t\left(\frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_j} + \frac{\partial \bar{u}_j}{\partial x_i}\right)\frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_j} = 2\nu_t D_{ij} D_{ij} \tag{2.49}$$

$$G = \beta\frac{\nu_t}{Prt} g\frac{\partial T}{\partial z} \tag{2.50}$$

Con $\beta = -\frac{1}{\rho}\frac{\partial \rho}{\partial T}$ y Prt el número de Prandtl.
La viscosidad turbulenta queda finalmente dada por (Wu, 2008):

$$\nu_t = c_\mu \frac{k^2}{\epsilon} \tag{2.51}$$

Las ecuaciones presentadas anteriormente corresponden al modelo $k - \epsilon$ "estándar" u están restringidas a Reynolds altos (Wu, 2008). Sin embargo, existen adaptaciones de este modelo que permiten ampliar su rango de aplicación, Por ejemplo:

- Modelo modificado Chen-Kim (Chen (1987), Chow (2005)), que considera un no-equilibrio entre la producción y disipación de energía cinética turbulenta, para mejorar la respuesta dinámica de la ecuación para ϵ.
- Modelo derivado de teoría de grupo de renormalización (Yakhot, 1991), (Chow, 2005), que agrega un término para tomar en cuenta la anisotropía de la turbulencia.

En la tabla 2.1 a continuación, adaptada de Wu (2008) y Hervouet (2007), se muestra los valores o expresiones funcionales de los coeficientes utilizados en las distintas versiones del modelo $k - \epsilon$. En todos los casos se tiene que $c_{3\epsilon} = 0$ si $G > 1$ y $c_{3\epsilon} = 1$ si $G \leq 0$. Para la formulación de Yakhot, $\eta = (2D_{ij}D_{ij})^{1/2}k/\epsilon$.

Tabla 2.1: Coeficientes usados en las distintas versiones del modelo $k-\epsilon$.

Modelo	c_μ	$c_{1\epsilon}$	$c_{2\epsilon}$	σ_k	σ_ϵ
Estándar	$0,09$	$1,44$	$1,92$	$1,0$	$1,3$
Chen-Kim	$0,09$	$1,15+0,25P/\epsilon$	$1,90$	$0,8927$	$1,15$
Yakhot	$0,085$	$1,42-\eta(1-\eta/4,38)/(1+0,015\eta^3)$	$1,68$	$0,7179$	$0,7179$

Modelo $k-\omega$

El modelo $k-\omega$ establecido por Wilcox (2006), representa la energía cinética turbulenta (k) y una tasa de disipación de esta energía por unidad de volumen y tiempo (ω), que también se puede interpretar como una frecuencia característica del proceso de disipación de energía turbulenta, o simplemente como la razón entre ϵ y k, a menos de una constante.

Las ecuaciones de este modelo quedan dadas por (Wilcox, 2006):

$$\frac{\partial k}{\partial t}+\frac{\partial(\bar{u}_i k)}{\partial x_i}=\frac{\partial}{\partial x_i}\left[\left(\nu+\frac{3}{5}\frac{k}{\omega}\right)\frac{\partial k}{\partial x_i}\right]+\nu_t\left(\frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_j}+\frac{\partial \bar{u}_j}{\partial x_i}\right)\frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_j}-\frac{9}{100}k\omega \tag{2.52}$$

$$\frac{\partial \omega}{\partial t}++\frac{\partial(\bar{u}_i \omega)}{\partial x_i}=\frac{13}{25}\frac{\omega}{k}\nu_t\left(\frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_j}+\frac{\partial \bar{u}_j}{\partial x_i}\right)\frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_j}-\beta\omega^2+\frac{\sigma_d}{\omega}\frac{\partial k}{\partial x_i}\frac{\partial \omega}{\partial x_i}+\frac{\partial}{\partial x_i}\left[\left(\nu+\frac{1}{2}\frac{k}{\omega}\right)\frac{\partial \omega}{\partial x_j}\right] \tag{2.53}$$

Con:

$$\sigma_d=\begin{cases}0, & \frac{\partial k}{\partial x_i}\frac{\partial \omega}{\partial x_i}\leq 0\\ \frac{1}{8}, & \frac{\partial k}{\partial x_i}\frac{\partial \omega}{\partial x_i}>0\end{cases} \tag{2.54}$$

$$\beta=0,0708\frac{1+85\chi_\omega}{1+100\chi_\omega} \tag{2.55}$$

$$\chi_\omega\equiv\left|\frac{\Omega_{ij}\Omega_{jk}D_{ki}}{\left(\frac{9}{100}\omega\right)^3}\right| \tag{2.56}$$

$$\Omega_{ij}=\frac{1}{2}\left(\frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_j}-\frac{\partial \bar{u}_j}{\partial x_i}\right) \tag{2.57}$$

2.4. Ecuaciones en dos dimensiones

En esta sección se desarrollan las ecuaciones que gobiernan el comportamiento hidrodinámico de ríos en dos dimensiones. La motivación para esto surge de que para la mayoría de los ríos, la versión integrada en la vertical de las ecuaciones 2.25 a 2.27 presentan resultados suficientemente precisos (Julien, 2018), siendo de más fácil aplicación. Esta ecuaciones se conocen como ecuaciones de Saint-Venant.

2.4.1. Hipótesis

Se continúa considerando la hipótesis de presiones hidrostáticas y densidad constante (Hervouet, 2007), por lo que sigue siendo válido que:

$$-\frac{1}{\rho}\frac{\partial p}{\partial z} - g = 0 \Longrightarrow p = p_{atm} + \rho g(z_s - z) \tag{2.58}$$

Se considera además que la componente vertical de la velocidad es despreciable, con lo que no se presenta una ecuación para la misma. La superficie y el fondo se consideran impermeables, o lo que es lo mismo, no existe transferencia de masa a través de esas superficies, lo cual se puede expresar como:

$$\frac{\partial z_s}{\partial t} + u_s\frac{\partial z_s}{\partial x} + v_s\frac{\partial z_s}{\partial y} - w_s = 0 \tag{2.59}$$

$$\frac{\partial z_f}{\partial t} + u_f\frac{\partial z_f}{\partial x} + v_f\frac{\partial z_f}{\partial y} - w_f = 0 \tag{2.60}$$

Siendo z_s (z_f) la cota de la superficie (del fondo), u_s, v_s y w_s (u_f, v_f y w_f) las componentes de la velocidad evaluadas en la superficie (el fondo).

2.4.2. Ecuación de continuidad

Tomando en cuenta lo anterior, y utilizando la regla de Leibniz, se tiene que la integral en vertical de la ecuación de continuidad resulta en:

$$\int_{z_f}^{z_s}\left(\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} + \frac{\partial w}{\partial z}\right)dz = 0 \Longrightarrow \frac{\partial h}{\partial t} + \nabla.(h\vec{u}) = 0 \tag{2.61}$$

Siendo $h = z_s - z_f$ la profundidad del agua en un punto $(x; y)$ dado, y donde la divergencia se calcula solamente en el plano horizontal.

2.4.3. Ecuación de conservación del momento

Se hace la siguiente definición para las componentes de la velocidad:

$$U \equiv \frac{1}{h}\int_{z_f}^{z_s} u dz \tag{2.62}$$

$$V \equiv \frac{1}{h}\int_{z_f}^{z_s} v dz \tag{2.63}$$

Siendo U y V las componentes de la velocidad promediada en vertical según las direcciones x e y respectivamente. Considerando las ecuaciones de conservación del momento en tres dimensiones, para las componentes horizontales del campo de velocidades, manteniendo la hipótesis de incompresibilidad y presiones hidrostáticas, según se presentaran en las ecuaciones de Navier-Stokes 2.26 y 2.27, se procede a la integración de las mismas en la vertical, presentado aquí como ejemplo la de la componente u de la velocidad, ya que ambas ecuaciones son equivalentes en términos formales. La integración del primer sumando del lado izquierdo, utilizando la regla de Leibniz queda como:

$$\int_{z_f}^{z_s} \frac{\partial u}{\partial t} dz = \frac{\partial}{\partial t} \int_{z_f}^{z_s} u dz - u_s \frac{\partial z_s}{\partial t} + u_f \frac{\partial z_f}{\partial t} = \frac{\partial (hU)}{\partial t} - u_s \frac{\partial z_s}{\partial t} + u_f \frac{\partial z_f}{\partial t} \tag{2.64}$$

El segundo sumando del lado izquierdo de la igualdad queda como:

$$\vec{u}.\nabla(u) = u\frac{\partial u}{\partial x} + v\frac{\partial u}{\partial y} + w\frac{\partial u}{\partial z} = \frac{\partial (uu)}{\partial x} + \frac{\partial (uv)}{\partial y} + \frac{\partial (uw)}{\partial z} \tag{2.65}$$

A continuación se integra en la vertical cada uno de los sumandos de la igualdad anterior:

$$\int_{z_f}^{z_s} \frac{\partial (uw)}{\partial z} dz = u_s w_s - u_f w_f \tag{2.66}$$

$$\begin{aligned}
\int_{z_f}^{z_s} \frac{\partial (uv)}{\partial y} dz = \frac{\partial}{\partial y} \int_{z_f}^{z_s} uv dz - u_s v_s \frac{\partial z_s}{\partial y} + u_f v_f \frac{\partial z_f}{\partial y} = \frac{\partial}{\partial y} \int_{z_f}^{z_s} (U + u - U)(V + v - V) dz - \\
- u_s v_s \frac{\partial z_s}{\partial y} + u_f v_f \frac{\partial z_f}{\partial y} = \frac{\partial}{\partial y} \int_{z_f}^{z_s} [UV + U(v - V) + (u - U)V + (u - U)(v - V)] dz - \\
- u_s v_s \frac{\partial z_s}{\partial y} + u_f v_f \frac{\partial z_f}{\partial y} = \frac{\partial (hUV)}{\partial y} + \frac{\partial}{\partial y} \int_{z_f}^{z_s} [Uv - UV + uV - UV] dz + \frac{\partial}{\partial y} \int_{z_f}^{z_s} u'' v'' dz = \\
= \frac{\partial (hUV)}{\partial y} + \frac{\partial}{\partial y} \int_{z_f}^{z_s} u'' v'' dz
\end{aligned} \tag{2.67}$$

$$\int_{z_f}^{z_s} \frac{\partial uu}{\partial x} dz = \frac{\partial (hU^2)}{\partial x} + \frac{\partial}{\partial x} \int_{z_f}^{z_s} u'' u'' dz - u_s^2 \frac{\partial z_s}{\partial x} + u_f^2 \frac{\partial z_f}{\partial x} \tag{2.68}$$

La integración mostrada en la ecuación 2.66 es trivial. Para la integración de las ecuaciones 2.67 y 2.68 se introducen $u'' \equiv (U - u)$ y $v'' \equiv (V - v)$, que representan las fluctuaciones de las componentes de la velocidad en torno a un promedio en la vertical. Estos dan lugar a términos de dispersión en las ecuaciones integradas en la vertical que quedan como, según x e y respectivamente (Hervouet, 2007):

$$\frac{1}{h}\frac{\partial}{\partial x} \int_{z_f}^{z_s} u'' u'' dz + \frac{1}{h}\frac{\partial}{\partial y} \int_{z_f}^{z_s} u'' v'' dz \tag{2.69}$$

$$\frac{1}{h}\frac{\partial}{\partial x}\int_{z_f}^{z_s} u'' v'' dz + \frac{1}{h}\frac{\partial}{\partial y}\int_{z_f}^{z_s} v'' v'' dz \tag{2.70}$$

Estos términos de dispersión son formalmente iguales a las tensiones de Reynolds, lo cual permite agregarlos al tensor de tensiones, modificando la viscosidad turbulenta en consecuencia, reemplazándola por una viscosidad efectiva ν_e (Hervouet, 2007).

Finalmente, el lado izquierdo de la igualdad 2.26, dejando de lado los términos de dispersión según el argumento anterior, queda como:

$$\begin{aligned}
&\frac{\partial(hU)}{\partial t} - u_s\frac{\partial z_s}{\partial t} + u_f\frac{\partial z_f}{\partial t} + \frac{\partial(hU^2)}{\partial x} - u_s^2\frac{\partial z_s}{\partial x} + u_f^2\frac{\partial z_f}{\partial x} + \frac{\partial(hUV)}{\partial y} + u_s w_s - u_f w_f = \\
&= \frac{\partial(hU)}{\partial t} + \frac{\partial(hU^2)}{\partial x} + \frac{\partial(hUV)}{\partial y} - u_s\left[\frac{\partial z_s}{\partial t} + u_s\frac{\partial z_s}{\partial x} + v_s\frac{\partial z_s}{\partial y} - w_s\right] + u_f\left[\frac{\partial z_f}{\partial t} + u_f\frac{\partial z_f}{\partial x} + v_f\frac{\partial z_f}{\partial y} - w_f\right] = \\
&= \frac{\partial(hU)}{\partial t} + \frac{\partial(hU^2)}{\partial x} + \frac{\partial(hUV)}{\partial y}
\end{aligned} \tag{2.71}$$

La última igualdad de la ecuación 2.71 se da a causa de la hipótesis de impermeabilidad expresada en las ecuaciones 2.59 y 2.60.

La integración vertical del primer término del lado derecho de la igualdad 2.26 implica simplemente multiplicar por la profundidad h, ya que se asume densidad constante. Lo mismo aplica para el segundo término. El Laplaciano de la componente u, se integra de la siguiente forma, teniendo en cuenta la linealidad del operador ∇ y recordando que se calcula únicamente en el plano horizontal:

$$\nu\int_{z_f}^{z_s}\nabla^2(u)dz = \nu\nabla.\int_{z_f}^{z_s}\nabla(u)dz = \nu\nabla.\int_{z_f}^{z_s}\left(\frac{\partial u}{\partial x};\frac{\partial u}{\partial y}\right)dz \tag{2.72}$$

$$\int_{z_f}^{z_s}\frac{\partial u}{\partial x_i} = \frac{\partial}{\partial x_i}\int_{z_f}^{z_s} u dz - u_s\frac{\partial z_s}{\partial x_i} + u_f\frac{\partial z_f}{\partial x_i} = \frac{\partial(hU)}{\partial x_i} - u_s\frac{\partial z_s}{\partial x_i} + u_f\frac{\partial z_f}{\partial x_i} \tag{2.73}$$

De las ecuaciones 2.72 y 2.73 se tiene:

$$\begin{aligned}
\nu\int_{z_f}^{z_s}\nabla^2(u)dz &= \nu\nabla.\left[\nabla(hU) - u_s\left(\frac{\partial z_s}{\partial x};\frac{\partial z_s}{\partial y}\right) + u_f\left(\frac{\partial z_f}{\partial x};\frac{\partial z_f}{\partial y}\right)\right] = \\
&= \nu\nabla.\left[U\nabla(h) + h\nabla(U) - u_s\nabla(z_s) + u_f\nabla(z_f)\right]
\end{aligned} \tag{2.74}$$

La ecuación 2.74 se puede simplificar considerando las siguientes hipótesis:

- Velocidad de fondo nula: $u_f = 0$.
- Superficie libre y fondo gradualmente variados: $\nabla(z_s) \approx \vec{0}$, $\nabla(z_f) \approx \vec{0}$ y $\nabla(h) \approx \vec{0}$

De lo anterior se tiene que:

$$\nu \int_{z_f}^{z_s} \nabla^2(u)dz \approx \nu \nabla.[h\nabla(U)] = \nabla.[h\nu\nabla(U)] \tag{2.75}$$

Luego, las ecuaciones de conservación del momento se pueden escribir como:

$$\frac{\partial(hU)}{\partial t} + \frac{\partial(hU^2)}{\partial x} + \frac{\partial(hUV)}{\partial y} = -\frac{h}{\rho}\frac{\partial p_{atm}}{\partial x} - hg\frac{\partial z_s}{\partial x} + \nabla.[h\nu_e(\nabla(U))] + hF_x \tag{2.76}$$

$$\frac{\partial(hV)}{\partial t} + \frac{\partial(hVU)}{\partial x} + \frac{\partial(hV^2)}{\partial y} = -\frac{h}{\rho}\frac{\partial p_{atm}}{\partial y} - hg\frac{\partial z_s}{\partial y} + \nabla.[h\nu_e(\nabla(V))] + hF_y \tag{2.77}$$

El conjunto de ecuaciones de continuidad (ecuación 2.61) y conservación del momento integradas en la vertical (ecuaciones 2.76 y 2.77) se conocen como ecuaciones de Saint-Venant, en su forma conservativa.

2.5. Métodos numéricos de resolución

Tanto las ecuaciones de Navier-Stokes como las de Saint-Venant carecen de soluciones analíticas generales conocidas, por lo que la resolución de las mismas, fuera de casos particulares relativamente simples, necesita de la aplicación de métodos numéricos computacionales. En esta sección se hace un resumen de algunos de los métodos numéricos más usuales al momento de resolver estos sistemas de ecuaciones.

2.5.1. Conceptos generales

Los métodos numéricos utilizados comparten la característica de ser discretos, lo cual surge como necesidad para su implementación computacional. De este modo, las cantidades computadas son representadas en un número finito de puntos en el espacio y en el tiempo, los cuales se conocen como "puntos de grilla". En el espacio entre estos puntos de grilla no se tiene un valor de la cantidad dado explícitamente por el método de resolución, sino que se recurre a métodos de interpolación, quedando la exactitud del resultado en estos puntos supeditada no sólo a la exactitud de la solución, sino también a la del método de interpolación (Abbott, 1979).

Según consigna Lomax (2001), dado un problema físico en un dominio acotado, gobernado por una serie de ecuaciones diferenciales, con determinadas condiciones de borde, la resolución numérica del mismo implica los siguientes puntos:

- Representación del dominio de cálculo con un conjunto finito de puntos en el espacio y el

tiempo ("puntos de grilla"). Esto implica la selección de una estrategia de discretización del dominio ("mallado"), para la división del mismo en celdas o elementos. La grilla puede ser "estructurada" (con elementos uniformes) o "desestructurada", con elementos de distintos tamaños que se adaptan a la geometría del problema.

- Discretización de las ecuaciones diferenciales que rigen el problema en la grilla de cálculo.
- Obtención de una solución discreta aproximada a la real en base a las ecuaciones discretas y condiciones de contorno. Para ello se debe implementar un método numérico. El método a utilizar está muy ligado al tipo de grilla de cálculo utilizada (estructurada o desestructurada).
- Interpretación de los resultados de la simulación, lo que incluye el posprocesamiento de los datos generados por el mismo, y lograr un entendimiento de los errores tanto numéricos como físicos del modelo en cuestión.

La solución obtenida debe ser precisa, en términos de su aproximación a la solución exacta; consistente, lo cual implica que en cada punto de grilla el sistema de ecuaciones discretizado sea consistente con el original; estable, lo cual se relaciona con la aparición, amplificación y propagación de errores en la ejecución del modelo; y convergente, lo cual implica que la solución discreta se aproxime en mayor grado a la solución exacta a medida que se reduce el tamaño de los elementos de grilla (Wu, 2008).

2.5.2. Discretización

Los métodos de discretización más usuales en mecánica de los fluidos computacional son el método de las diferencias finitas, el método de elementos finitos, y el método de volúmenes finitos (Wu (2008), Lomax (2001)). A continuación se describe brevemente el funcionamiento básico de cada uno de ellos.

Diferencias finitas

El método de las diferencias finitas, en términos generales, discretiza una ecuación diferencial aproximando el operador diferencial con un operador diferencia en cada punto del espacio-tiempo (Wu, 2008). Su uso está limitado a grillas de cálculo regulares. La derivada primera respecto al espacio de una cantidad se puede aproximar por diferencia hacia adelante, centrada y hacia atrás, (Nakamura (1991), Abbott (1979)), pudiendo hacerse lo mismo con la derivada temporal.

Se puede hacer otras aproximaciones de las derivadas parciales tanto temporales como espaciales utilizando una combinación ponderada de las aproximaciones anteriores, o introduciendo valores de puntos de la grilla más alejados en el tiempo o el espacio del punto que se busca aproximar (Abbott, 1979).

Algunos de los esquemas utilizados para la discretización de problemas unidimensionales no estacionarios son los siguientes (Wu, 2008):

- Esquema de Euler.
- Esquema Leapfrog.
- Esquema Lax-Wendroff.
- Esquema Crank-Nicholson.
- Esquema Preissmann.

Para el caso de problemas bidimensionales o tridimensionales, es necesario recurrir a métodos de resolución como el implícito o explícito de dominio completo, implícito de dirección alternante (ADI), o el de partición del operador (Wu, 2008).

Elementos finitos

Este método parte de la discretización del dominio de cálculo continuo en sub-áreas, conocidas como elementos finitos. Estos elementos quedan vinculados por un número finito de puntos ubicados en su perímetro, los cuales representan los nodos de cálculo de la grilla. En estos nodos se calcula la solución aproximada a la ecuación o sistema de ecuaciones diferenciales que se busque resolver. El método de los elementos finitos es especialmente útil en grillas no estructuradas (Szymkiewicz, 2010).

Una vez definido el dominio de cálculo discreto, la resolución del problema se basa en la aplicación de un método de interpolación y un método de variación conocido como residuo ponderado (Hervouet, 2007). La ecuación aproximada obtenida entrega un residuo al momento de buscar satisfacer la ecuación diferencial original. El método de los elementos finitos busca minimizar este residuo, ponderándolo en el dominio de cálculo.

El método más utilizado en la práctica para definir las funciones de ponderación es el de Galerkin (Szymkiewicz, 2010), que consiste en considerarlas iguales a las funciones de forma. A su vez, las funciones de forma más utilizadas para la interpolación corresponden a funciones lineales, que valen 1 en el nodo en cuestión, y 0 en el resto del dominio discreto (Hervouet, 2007).

Para la resolución del problema, la ecuación diferencial parcial se aproxima en primera instancia en el espacio, usando el método de los elementos finitos, con lo cual se obtiene un sistema de ecuaciones diferenciales ordinarias (ODE) respecto al tiempo t. Este sistema se resuelve a su vez utilizando métodos idóneos para las ODEs, lo que lleva a un sistema de ecuaciones algebráicas, que se resuelve utilizando métodos directos, teniendo en cuenta las condiciones de borde del problema (Szymkiewicz, 2010).

Volúmenes finitos

El método de los volúmenes finitos presenta un par de características que lo hacen atractivo para la resolución de problemas en mecánica de los fluidos computacional: permite de forma natural que la discretización sea conservativa, en el sentido de que se verifica la conservación de las cantidades físicas discretizadas en el problema; y puede ser aplicado en grillas no estructuradas sin necesidad de aplicar una transformación en las coordenadas del problema, permitiendo ajustar la discretización espacial a dominios de cálculo con geometrías complejas (Lomax, 2001).

Para la discretización del dominio de cálculo se considera, alrededor de cada nodo de la grilla, un volumen de control Ω_i que contiene únicamente a este nodo dentro de su frontera, y que comparte su frontera con los volúmenes de control de los nodos adyacentes. La ecuación o sistema de ecuaciones diferenciales que rigen el problema se integran en el espacio dentro de cada volumen de control, y se debe considerar el flujo generado en la frontera de éste (Wu, 2008). De este modo, el método de los volúmenes finitos busca satisfacer la forma integral de las ecuaciones de conservación que rigen el problema.

Para volúmenes de control distintos, que compartan parte de su frontera, el valor de flujo puede diferir, llevando a una discontinuidad del flujo (Lomax, 2001). En este sentido, existen varios esquemas para compatibilizar esta diferencia (Wu, 2008):

- Esquema central: adopta una interpolación lineal de la cantidad a determinar, con lo que el valor en la frontera entre dos celdas contiguas queda dado por el promedio de los valores en los nodos de grilla correspondientes.
- Esquema *upwind*: en este esquema se el valor de la cantidad a determinar en una frontera entre volúmenes de control adopta el valor del elemento que se encuentra corriente arriba.
- Esquema híbrido: combina el esquema central con el esquema *upwind*, usando uno u otro en los escenarios que presentan mejores resultados, respectivamente.
- Esquema QUICK: aproxima los valores de la cantidad a determinar en la frontera del volumen ajustando un perfil parabólico con los valores de la cantidad en el nodo en cuestión y los dos nodos corriente arriba de este.
- Esquema SOUCUP: combina los esquemas *upwind* de segundo orden, de diferencia central y *upwind* de primer orden.
- Esquema HLPA: combina un ajuste parabólico por tres puntos con un esquema *upwind* de primer orden.

Una vez obtenido el valor del flujo neto en el volumen de control, se puede avanzar la solución en el tiempo para obtener nuevos valores de la cantidad.

Capítulo 3

Análisis de información de base

En este capítulo se hace una revisión y análisis de la información de base disponible para el desarrollo de esta tesis, específicamente en lo concerniente a la caracterización de los niveles de superficie libre, caudales tanto del río Uruguay como de sus afluentes, y velocidades del río.

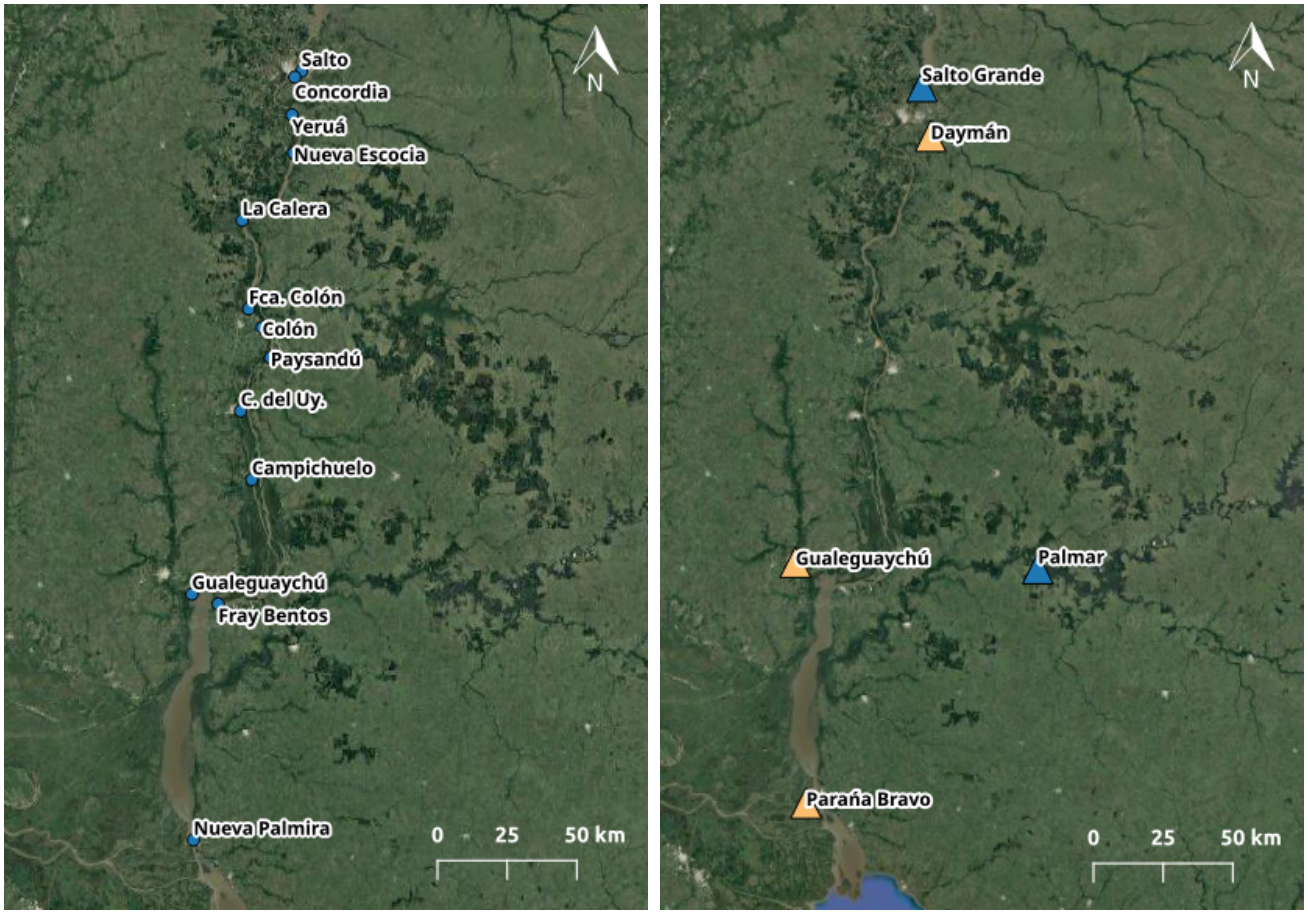
Este análisis tiene dos objetivos: el primero es conocer el comportamiento del sistema en estudio en base a datos medidos; y el segundo, determinar la disponibilidad y calidad de los datos para su utilización en la implementación, calibración y validación del modelo hidrodinámico objeto de esta tesis.

3.1. Niveles

Se realiza un análisis de los registros de niveles de 13 estaciones a lo largo del río Uruguay, tanto en la costa uruguaya como en la argentina, así como también en la desembocadura del río Uruguay en el Río de la Plata (ver figura 3.1a). Según su ubicación de Norte a Sur, las estaciones son: Salto, Concordia, Yeruá, Nueva Escocia, La Calera, Fábrica Colón, Colón, Paysandú, Concepción del Uruguay, Puerto Campichuelo, Gualeguaychú, Fray Bentos y Nueva Palmira. La información utilizada proviene en su mayoría de datos proporcionados por la CARU, obtenidos para la costa uruguaya, de registros de la Dirección Nacional de Aguas (DINAGUA), y para la costa argentina de registros de la Dirección Nacional de Vías Navegables (DNVN).

En primera instancia se pasan las mediciones a un mismo sistema de referencia vertical (Plano de Referencia Hidrométrico - Ex Wharton). Cabe destacar que todos los datos de niveles son posteriores a la construcción del embalse de Salto Grande. Luego se procesa la información disponible en cada una de las estaciones mencionadas, realizando un análisis de calidad de los datos mediante comparaciones globales de las series entre estaciones enfrentadas (esto es, cercanas en términos de la progresiva del río, pero en márgenes opuestas) y estaciones de la misma margen, y cuantificando la densidad de los mismos tanto por día como por mes. Se descartan tramos de las series donde se observan anomalías que no puedan ser corregidas en

base a un análisis más minucioso de los datos originales. Luego de esto, se separa cada serie, en caso de que corresponda, en subconjuntos con la misma frecuencia de registro de datos. Los subconjuntos obtenidos se muestran en la tabla 3.1. A modo de ejemplo, se presenta la serie para la estación de Salto, en su tramo "Salto 3" en distintas escalas temporales: totalidad de la duración de la serie, un año y un mes, lo cual se puede ver en la figura 3.2.



(a) Ubicación de estaciones de registro de niveles.

(b) Ubicación de estaciones de registro (triángulos azules) o estimación (triángulos anaranjados) de caudales.

Figura 3.1: Ubicación de estaciones de registro o estimación de datos hidrométricos en el río Uruguay.

En la tabla 3.2 se muestran los estadísticos básicos de los subconjutnos con un mismo paso temporal, o densidad de registro de datos, agrupados por estaciones. Según se puede apreciar, los valores medios de nivel presentan una tendencia decreciente desde aguas arriba hacia aguas abajo, al igual que la desviación estándar, lo cual muestra que aguas arriba los niveles presentan una mayor variación que aguas abajo, lo que también queda en evidencia con el rango de variación dado por los valores mínimo y máximo presentados. En la estación de Salto se tiene un rango de aproximadamente 16 m, con una desviación estándar de 3,44 m, mientras que en la de Nueva Palmira se tiene un rango mucho menor, del orden de 3 m, con una desviación estándar de 0,55 m. La variación anterior se visualiza en los gráficos de series

temporales de niveles para las estaciones, presentándose a modo de ejemplo el correspondiente al año 2008 en la figura 3.3. En ese gráfico se visualiza como en momentos con niveles bajos, asociados a caudales bajos erogados por Salto Grande, como el acontecido alrededor del 1/4/08, las diferencias de nivel entre las estaciones es mínima, del orden de 1 m entre Salto y Nueva Palmira, mientras que en momentos de crecida, como el sucedido alrededor del 1/11/08, se puede ver una diferencia de registro en el nivel de superficie libre de alrededor de 12 m en el pico de la crecida entre Salto y Nueva Palmira. Se observa asimismo que la variabilidad horaria de la señal en la estación de Salto, asociada a períodos de caudales medios donde la operación de las turbinas de la central hidroeléctrica de Salto Grande determina el caudal pasante, no es transmitida aguas abajo, viéndose prácticamente aplacada en Paysandú, estación que también cuenta con registros cada una hora.

En el apéndice 1 se presenta en mayor detalle el procesamiento de los datos de nivel realizado.

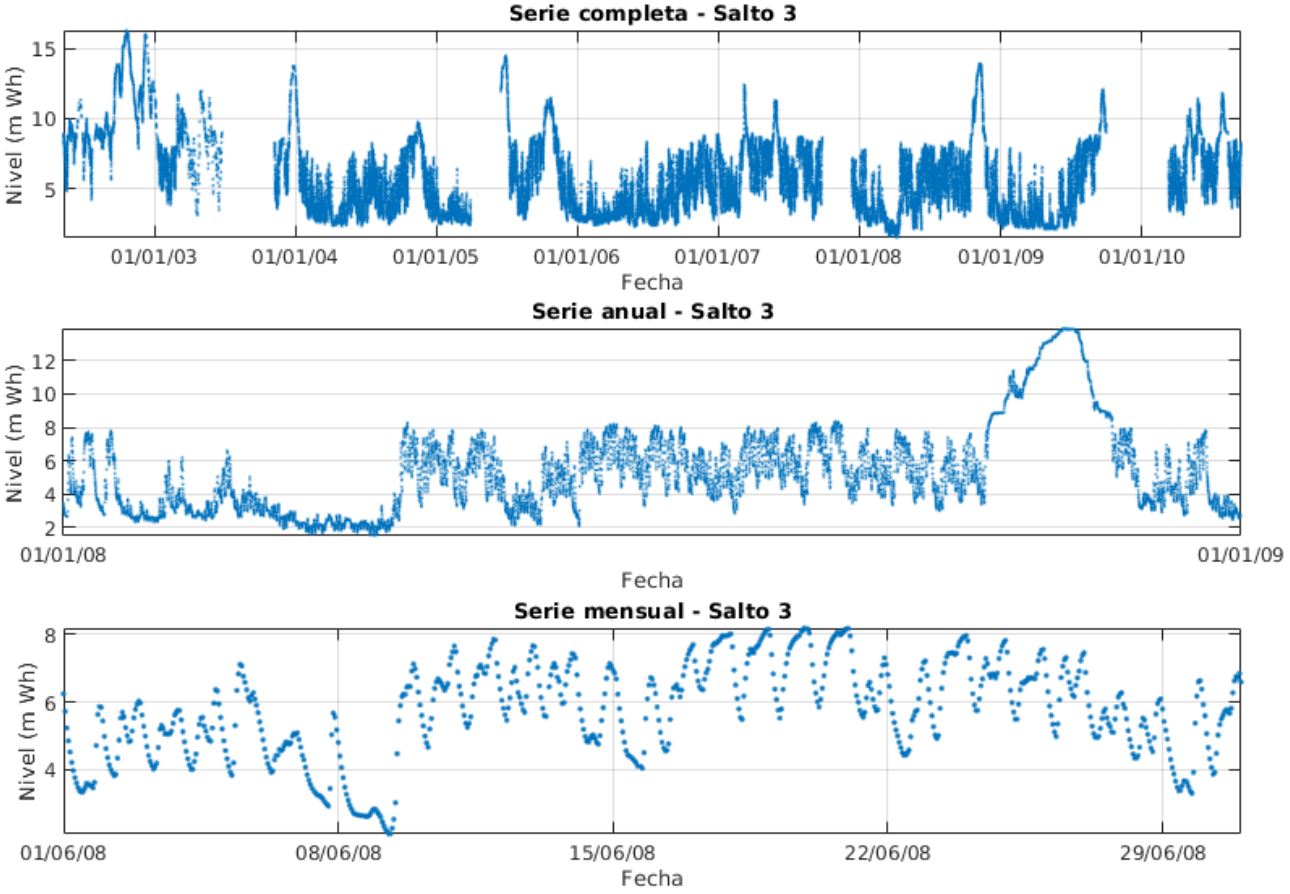


Figura 3.2: Serie temporal de niveles con frecuencia de un registro por hora para la estación de Salto.

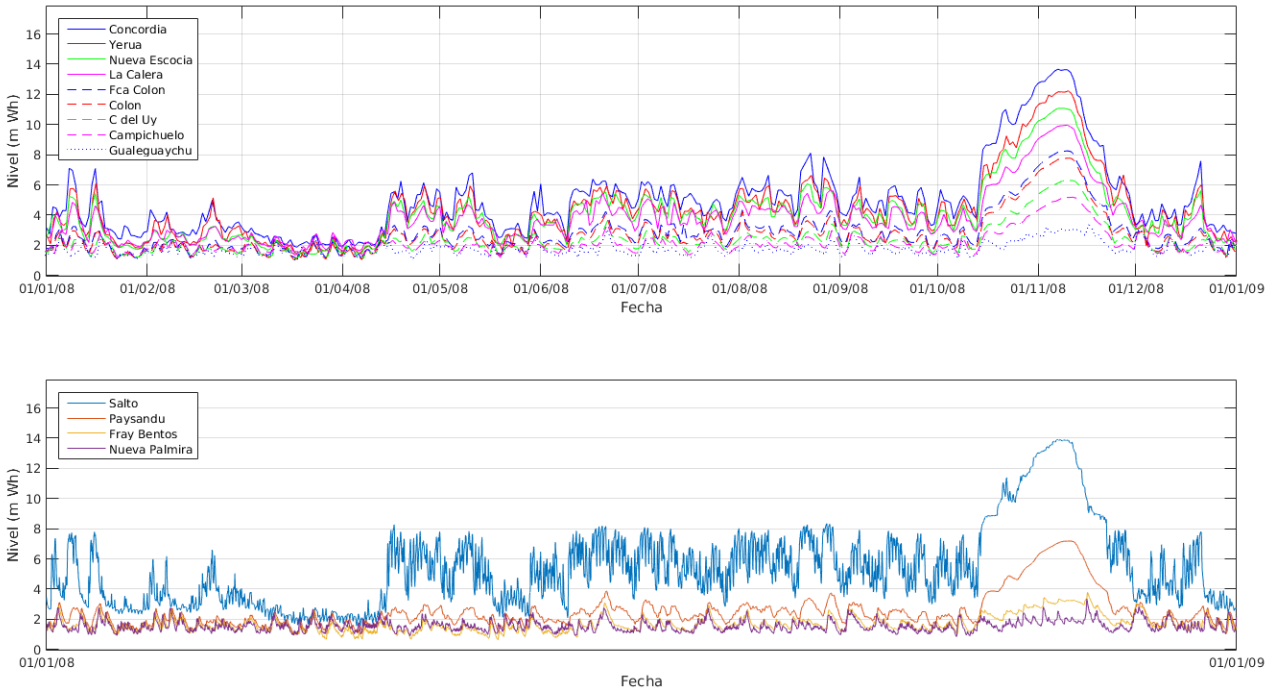


Figura 3.3: Series temporales de niveles para el año 2008, en todas las estaciones. Arriba: estaciones en la costa argentina; abajo: estaciones en la costa uruguaya.

Tabla 3.1: Características de las series de nivel con misma densidad de registro, obtenidas del procesamiento de las series temporales completas de cada estación, generando subconjuntos de datos con un mismo paso de tiempo para cada una de ellas (e.g.: un dato por día, tres datos por día, un dato por hora, etc.). Los subconjuntos no necesariamente son continuos, pudiendo tener baches que responden a una densidad de registro diferente o faltante de datos en la serie original.

Estación	**Tramo**	**Fecha inicio**	**Fecha fin**	**Registro**
Salto	Salto 1	ene-1980	jul-1986	Diario
	Salto 2	ago-1986	may-2002	3 a 4 por día
	Salto 3	may-2002	ene-2010	Horario
Concordia	Concordia 1	ene-1980	nov-2012	Diario
	Concordia 2	nov-2012	ene-2015	Horario
Yeruá	–	ene-1980	dic-2013	Diario
Nueva Escocia	–	ene-1980	dic-2013	Diario
La Calera	–	mar-1995	dic-2013	Diario
Fca. Colón	–	ene-1980	dic-2013	Diario
Colón	Colón 1	ene-1980	nov-2012	Diario
	Colón 2	nov-2012	oct-2015	Horario
Paysandú	Paysandú 1	ene-1980	dic-1991	3 a 4 por día
	Paysandú 2	ene-1992	dic-1992	Horario
	Paysandú 3	ene-1993	dic-1994	4 por día
	Paysandú 4	ene-1995	dic-2010	Horario
	Paysandú 5	dic-2010	jun-2014	Cada 1/2 hora
C. del Uruguay	Concepción 1	ene-1980	nov-2012	Diario
	Concepción 2	nov-2012	oct-2015	Horario
Campichuelo	–	dic-1982	dic-2011	Diario
Gualeguaychú	–	dic-1982	dic-2011	Diario
Fray Bentos	Fray Bentos 1	sep-1982	jul-1986	3 por día
	Fray Bentos 2	ago-1986	dic-1991	Horario
	Fray Bentos 3	ene-1992	dic-1993	3 por día
	Fray Bentos 4	ene-1994	dic-1994	Horario
	Fray Bentos 5	ene-1995	dic-1995	Diario
	Fray Bentos 6	ene-1996	dic-2010	Horario
Nueva Palmira	Nueva Palmira 1	ene-1980	mar-1980	Horario
	Nueva Palmira 2	mar-1980	dic-1983	2 por día
	Nueva Palmira 3	ene-1984	dic-1985	Horario
	Nueva Palmira 4	ene-1986	jul-1986	2 por día
	Nueva Palmira 5	ago-1986	dic-2010	Horario

Tabla 3.2: Estadísticos para subconjuntos de series de nivel con la misma densidad de registros para cada estación.

Tramo	Media (m Wh)	Std. (m)	Mín. (m Wh)	Máx. (m Wh)
Salto 1	6,88	3,44	1,68	17,82
Salto 2	6,79	3,08	1,88	17,68
Salto 3	5,87	2,88	1,51	16,27
Concordia 1	6,38	3,06	1,87	17,44
Concordia 2	7,52	2,31	2,23	15,87
Yeruá	5,51	2,75	1,19	15,73
Nueva Escocia	5,13	2,52	1,27	14,57
La Calera	4,53	2,089	1,46	13,05
Fca, Colón	3,52	1,72	0,63	11,01
Colón 1	3,34	1,77	0,79	10,77
Colón 2	3,76	1,48	1,25	9,76
Paysandú 1 y 3	3,20	1,55	0,52	9,78
Paysandú 2 y 4	3,22	1,66	0,56	9,95
Paysandú 5	2,78	1,09	0,71	7,90
Concepción 1	2,96	1,38	0,61	8,81
Concepción 2	3,31	1,15	1,23	7,95
Campichuelo	2,62	1,07	0,72	7,47
Gualeguaychú	2,12	0,66	0,57	4,89
Fray Bentos 1 y 3	2,38	0,71	0,87	5,10
Fray Bentos 2, 4 y 6	2,04	0,66	0,55	4,75
Fray Bentos 5	1,85	0,41	0,93	2,91
Nueva Palmira 1, 3 y 5	1,79	0,44	0,72	4,20
Nueva Palmira 2 y 4	1,89	0,55	0,72	3,87

3.2. Caudales

Se cuenta con los datos de caudal en las estaciones que se listan a continuación, cuya ubicación se presenta en la figura 3.1b.

- Caudal erogado por la represa de Salto Grande (datos generados por la Comisión Técnica Mixta de Salto Grande).
- Caudal para el río Daymán (datos generados por DINAGUA).
- Caudal para el río Gualeguaychú (datos generados en base a modelación hidrológica de paso diario por Erasun (2018)).
- Caudal erogado por la Central Hidroeléctrica Constitución (Represa de Palmar), en el río Negro (datos generados por la UTE).
- Caudal para el río Paraná Bravo (ajustado según la partición de caudales presentada en Sabarots et al. (2012) como el 31 % del caudal del Paraná Guazú en base a datos generados por el Instituto Nacional del Agua de Argentina).

La disponibilidad y densidad de estos datos se resume en la tabla 3.3. Los datos requieren de una mínima depuración, ya que no se identifican problemas de calidad mayores. A modo de ejemplo en la figura 3.4 se presenta la serie temporal de caudales para el año 2008. En esta figura se puede apreciar cómo los valores de caudal erogado por Salto Grande se encuentran la mayoría del tiempo por lo menos un orden de magnitud por encima de los restantes, excepto del correspondiente al Paraná Bravo. Se puede apreciar asimismo que el caudal erogado por Salto Grande tiene, en el rango por debajo de los 10.000 m^3/s, oscilaciones de período diario, que responden al patrón de generación de energía eléctrica de la central, mientras que en eventos de crecida, esas oscilaciones se ven fuertemente atenuadas por el caudal pasante por los vertederos.

En la tabla 3.4 se presentan los estadísticos básicos para las series de caudales. Según se puede apreciar en ésta tabla, la serie con mayor valor medio, desviación estándar y rango corresponde a la de Salto Grande, siendo la de mayor influencia en el sistema. El Paraná Bravo le sigue en magnitud de éstos parámetros (excepto en rango, donde Palmar es la segunda en magnitud), encontrándose este ingreso de caudal muy cerca de la desembocadura al Río de la Plata. Palmar presenta valores medios del orden del 16 % de los de Salto Grande, con valores máximos del orden del 40 % de los de éste último, por lo cual también representa un forzante significativo del sistema en su último tramo. Daymán presenta valores medios dos órdenes de magnitud menores que los de Salto Grande, con un máximo del orden de la media de éste último. Gualeguaychú es el que presenta los menores valores, tanto en términos de la media como del máximo caudal, el cual no alcanza los 1.000 m^3/s en el período de datos disponible.

En el apéndice 2 se presenta en mayor detalle el procesamiento de datos de caudal realizado. En ese análisis se observa una alta correlación entre las señales de caudal de Salto Grande y nivel de Salto y Concordia para desfases temporales de entre 2 a 3 horas, con mayor dispersión en los caudales menores a 8.000 m^3/s, mientras que para el caso de Paysandú, la correlación se maximiza para un desfase temporal de alrededor de 40 horas, mostrando mayor dispersión que en los casos de Salto y Concordia, principalmente en los caudales inferiores a 8.000 m^3/s.

Tabla 3.3: Disponibilidad de datos para series de caudal.

Estación	**Fecha inicio**	**Fecha fin**	**Registro**	**Origen**
Salto Grande	ene-1995	mar-2016	Horario	Aforo en represa
Daymán	ene-1980	dic-2010	Diario	Aforo en río
Gualeguaychú	ene-2004	dic-2010	Diario	Modelo hidrológico
Palmar	ene-2004	mar-2016	Diario	Aforo en represa
Paraná Bravo	ene-1980	dic-2014	Diario	Aforo en río

Tabla 3.4: Estadísticos para series de caudal (datos en m^3/s).

Estación	Media	Std.	Mín.	Máx.
Salto Grande	5401	4842	0	30623
Daymán	82	257	0	4157
Gualeguaychú	36	88	0	941
Palmar	887	1052	0	11960
Paraná Bravo	3526	1204	1953	8711

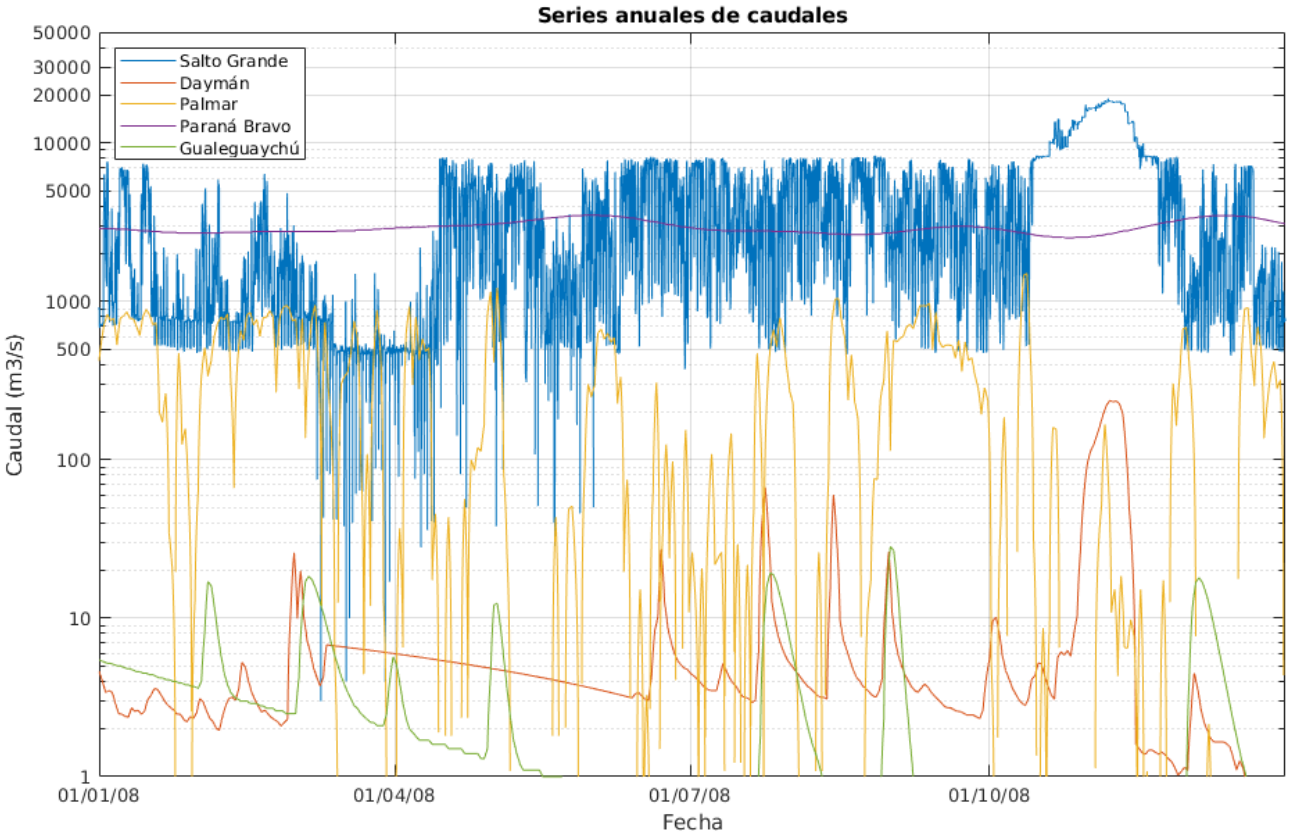


Figura 3.4: Series temporales de caudales para el año 2008, en todas las estaciones. Eje vertical en escala logarítmica.

3.3. Velocidades

Se cuenta con datos de velocidad relevados por la CARU entre el 28/8/12 y el 18/12/17 en varias secciones transversales del río. Las mediciones de velocidad se hicieron mediante ADCP montado a una embarcación. En total son 741 relevamientos, los cuales se depuran y procesan, descartando los que estén fuera de la zona de interés y juntando los correspondientes a una misma instancia de muestreo, para obtener 126 perfiles de velocidad que se agruparon en 11 zonas dentro del área de estudio, cuya ubicación se presenta en la figura 3.5. Se observa que la distribución espacial de los relevamientos es bastante uniforme a lo largo del río, con mayor

concentración alrededor de las ciudades de Salto y Concordia, Paysandú y Colón, Fray Bentos, y Nueva Palmira.

Los datos brutos del ADCP se procesan en primera instancia con el software Riversurveyor Live, de modo de obtener para cada transecta archivos en formato "Teledyne MAT". A su vez, para el procesamiento de los archivos Teledyne MAT se utiliza el software Velocity Mapping Toolbox (VMT) (Parsons et al., 2013), el cual permite obtener, entre otros parámetros de interés, las componentes Este-Oeste y Norte-Sur de la velocidad promediada en la profundidad, la velocidad promediada en la profundidad proyectada según la dirección de flujo, el perfil en corte transversal del lecho del río en cada sección, la profundidad de agua y el caudal circulante por la sección relevada.

El VMT permite además promediar transectas de una misma sección correspondientes a una misma instancia de relevamiento que cuente con varias "pasadas" (entiéndase por "pasada" el recorrido de una margen a otra del río). La promediación de varias transectas se utiliza para aproximar una media temporal, reduciendo la incertidumbre de las mediciones asociadas al ruido del instrumento y a fluctuaciones turbulentas de la velocidad, permitiendo así visualizar de mejor manera los patrones globales del campo de velocidad, independizándose de las variaciones locales e instantáneas. Una vez obtenida la transecta promedio, se realiza sobre esta una subsiguiente promediación espacial en sentido transversal al eje del río, esto es, sobre el largo de la transecta promedio, para los datos del perfil de velocidades en planta, utilizando una ventana móvil de promediación con un ancho de 20 celdas de medición del ADCP (que corresponden a aproximadamente 20 m), con el mismo objetivo de disminuir el ruido en los datos de velocidad (Parsons et al., 2013).

En la figura 3.6 se muestra a modo de ejemplo un acercamiento a las transectas relevadas en la zona del km 105, en los alrededores de la ciudad de Fray Bentos y el puente General San Martín, en la que se identifican 8 subgrupos. De estos únicamente los del km 106 y km 105 contienen más de 2 transectas (3 y 23 respectivamente).

Para todos los subgrupos se generan gráficos en planta de la velocidad longitudinal promediada en la profundidad, así como de la sección transversal del lecho del río en términos de la profundidad relevada, los cuales se pueden ver de la figura 3.7 a la 3.15. Para los subgrupos con más de 3 transectas se representan además las velocidades mínima, media y máxima en función del caudal circulante.

En la figura 3.8, correspondiente al subgrupo km 105, inmediatamente aguas abajo del puente General San Martín, que es el que cuenta con más instancias de medición, se puede observar dos eventos de inversión de flujo para las fechas 25/11/14 y 10/3/16, los cuales se ven como perfiles de velocidad con valores negativos del orden de 0,10 m/s. En esta se visualiza también que los mayores valores de velocidad se dan sobre el canal principal, zona de mayor profundidad, teniendo valores menores en las zonas de profundidad menor. La diferencia más

notoria se observa para el perfil asociado a un caudal de 14.000 m^3/s aproximadamente, donde la velocidad sobre el canal es del orden de los 0,90 m/s, mientras que fuera de este es de entre 0,60 a 0,70 m/s (según se puede ver en la figura correspondiente, este perfil presenta un error de medición alrededor de los -300 m del distancia al eje central). En la sección de Nueva Palmira (figura 3.7) se tiene un comportamiento similar, existiendo un canal principal fuertemente marcado, así como en la sección del km 220 (figura 3.12). En las demás secciones este comportamiento no es tan evidente, o directamente no se observa, teniendo perfiles de velocidad en planta más uniformes.

En la figura 3.16, que ilustra los estadísticos de velocidad para el subgrupo km 105, se puede ver una clara relación de proporcionalidad directa entre la velocidad y el caudal, como es esperable, donde incluso los eventos de inversión de flujo registrados caen dentro de la tendencia global para la velocidad media. Es evidente también el aumento en la dispersión de los valores de velocidad a medida que aumenta el caudal, ya sea con signo positivo o negativo (i.e.: inversión de flujo). Las velocidades medias en función del caudal para la totalidad de las estaciones se muestran en la figura 3.17, en la que se aprecia que en términos generales, la pendiente de la relación velocidad-caudal aumenta a medida que se avanza aguas arriba en el río, indicando que las velocidades medias para un mismo caudal circulante son mayores mientras más al Norte se encuentre la sección, lo cual se explica por las diferencias morfológicas de los distintos tramos, que van aumentando su sección y ancho en planta de Norte a Sur.

En la tabla 3.5 se muestran los rangos de velocidad y profundidad media en la sección, así como caudal aforado, para los subgrupos con más de 3 transectas. Los valores máximos de velocidad media son del orden de 1,0 m/s para la mayoría de las secciones relevadas, mientras que los valores mínimos son del orden de 0,10 m/s. Los caudales mínimos aforados en valor absoluto son del orden de 1.000 m^3/s para la mayoría de las secciones, el máximo caudal de inversión de flujo aforado del orden de 1.500 m^3/s, registrado en el km 105, mientras que los máximos llegan a valores de 20.000 m^3/s.

En el apéndice 3 se presenta en mayor profundidad el procesamiento realizado a las mediciones de velocidad mediante ADCP.

Tabla 3.5: Rango de velocidades medias, profundidades medias y caudales aforados para cada subgrupo con más de 3 transectas relevadas.

Subgrupo	Velocidad media (m/s)		Profundidad media (m)		Caudal (m^3/s)	
	Mín.	Máx.	Mín.	Máx.	Mín.	Máx.
km 384	0,21	1,16	4,17	9,56	1.460	9.051
km 317	0,15	1,29	7,89	19,9	1.083	17.745
km 230	0,35	0,81	3,90	11,44	1.642	11.820
km 220	0,45	0,73	6,32	12,17	6.714	20.482
km 214	0,10	1,09	9,47	16,17	840	17.507
km 140 - 1	0,16	0,86	10,73	15,62	1.471	10.466
km 140 - 2	0,12	0,86	7,41	11,41	481	4.093
km 105	0,03	0,73	9,52	12,01	631	13.977
km 009	0,05	0,41	10,84	11,55	839	11.196

Figura 3.5: Ubicación de las 11 zonas en que se agruparon los perfiles de velocidad relevados.

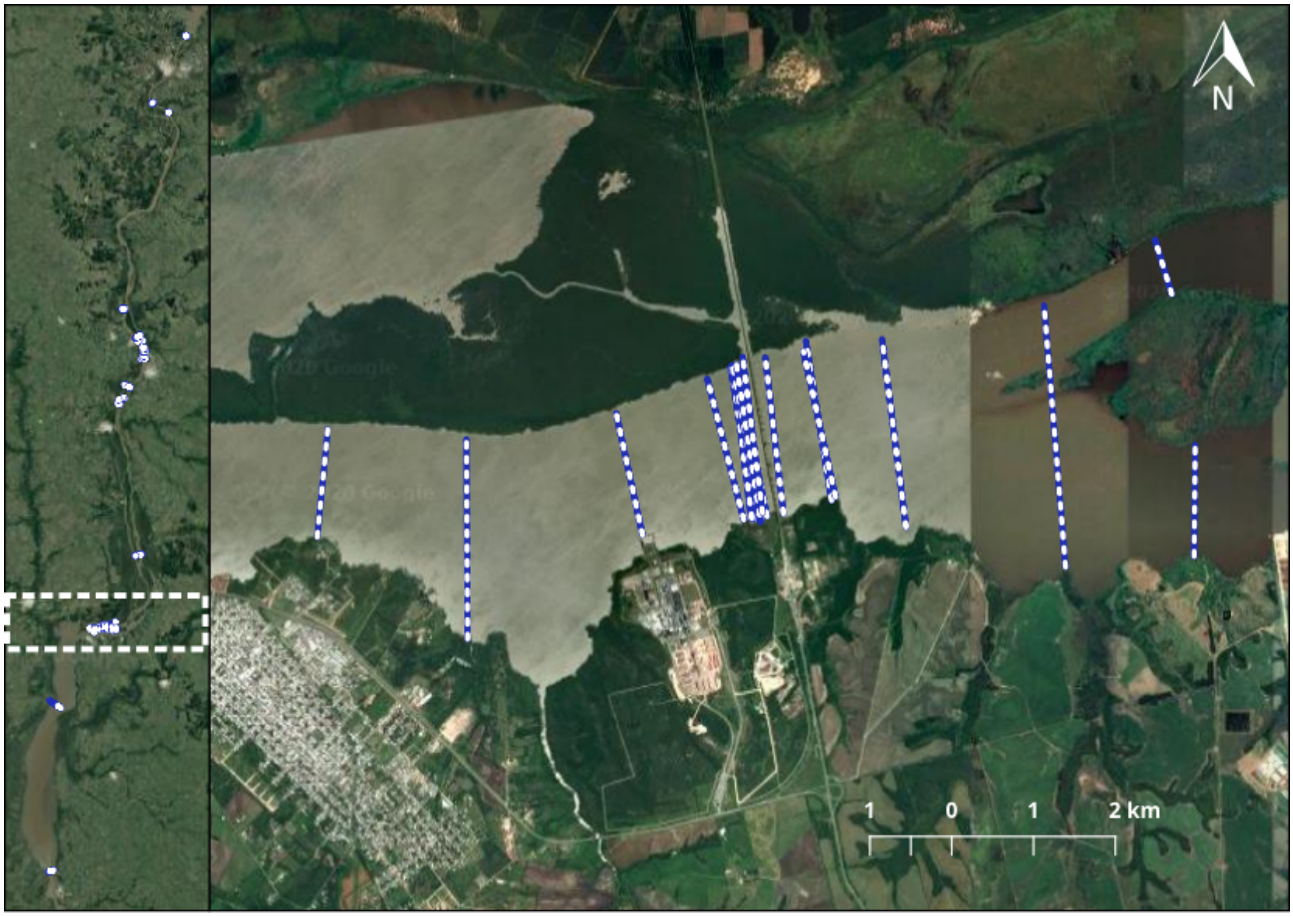


Figura 3.6: Ubicación de transectas para km 110, km 108, km 106,5, km 106, km 105, km 104, km 102 y km 100,5 del río. El grupo del km 110 contiene 2 transectas relevadas el 10/10/17, el km 108 contiene 1 relevada esa misma fecha, así como el km 106,5, el km 104, el km 102 y el km 100,5. El km 106 contiene 3 transectas relevadas entre el 10/10/17 y el 15/12/17, mientras que el km 105 contiene 23 transectas relevadas entre el 25/11/14 y el 10/10/17.

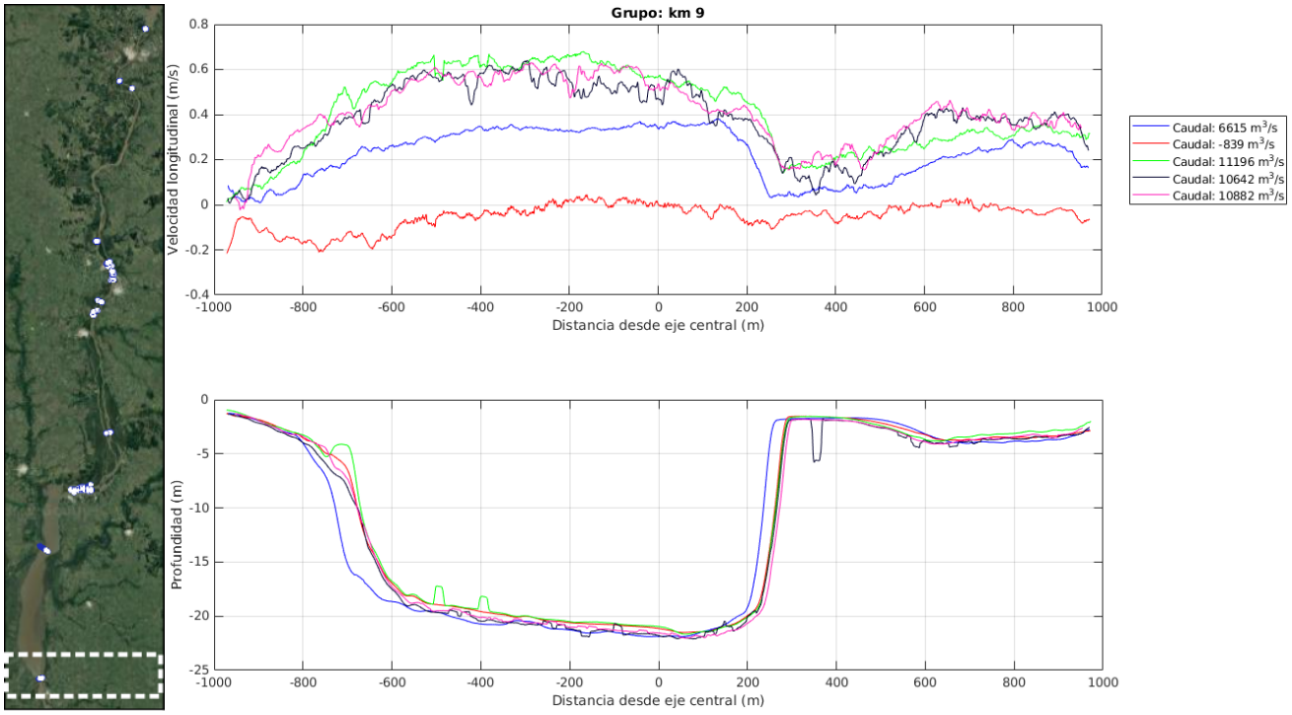


Figura 3.7: Velocidad y profundidad para km 9. Arriba: perfil en planta de velocidad promediada en vertical. Abajo: perfiles del lecho en términos de profundidad.

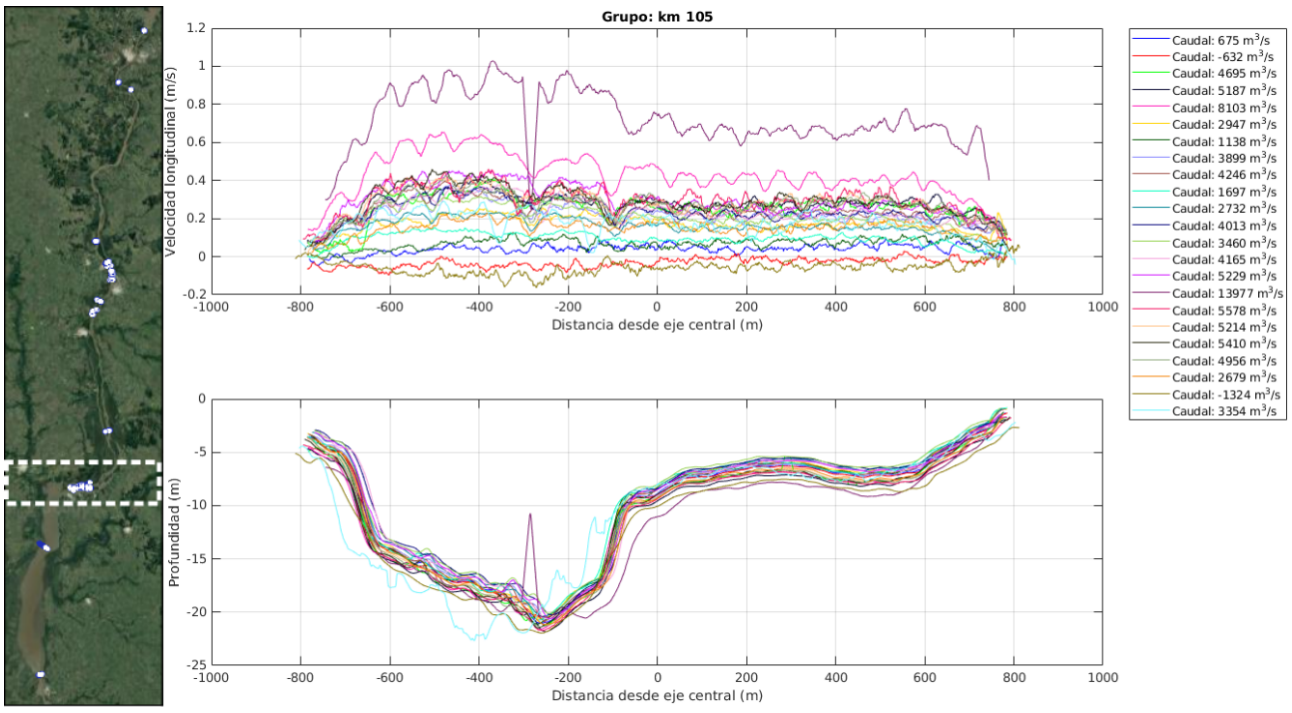


Figura 3.8: Velocidad y profundidad para km 105. Arriba: perfil en planta de velocidad promediada en vertical. Abajo: perfiles del lecho en términos de profundidad.

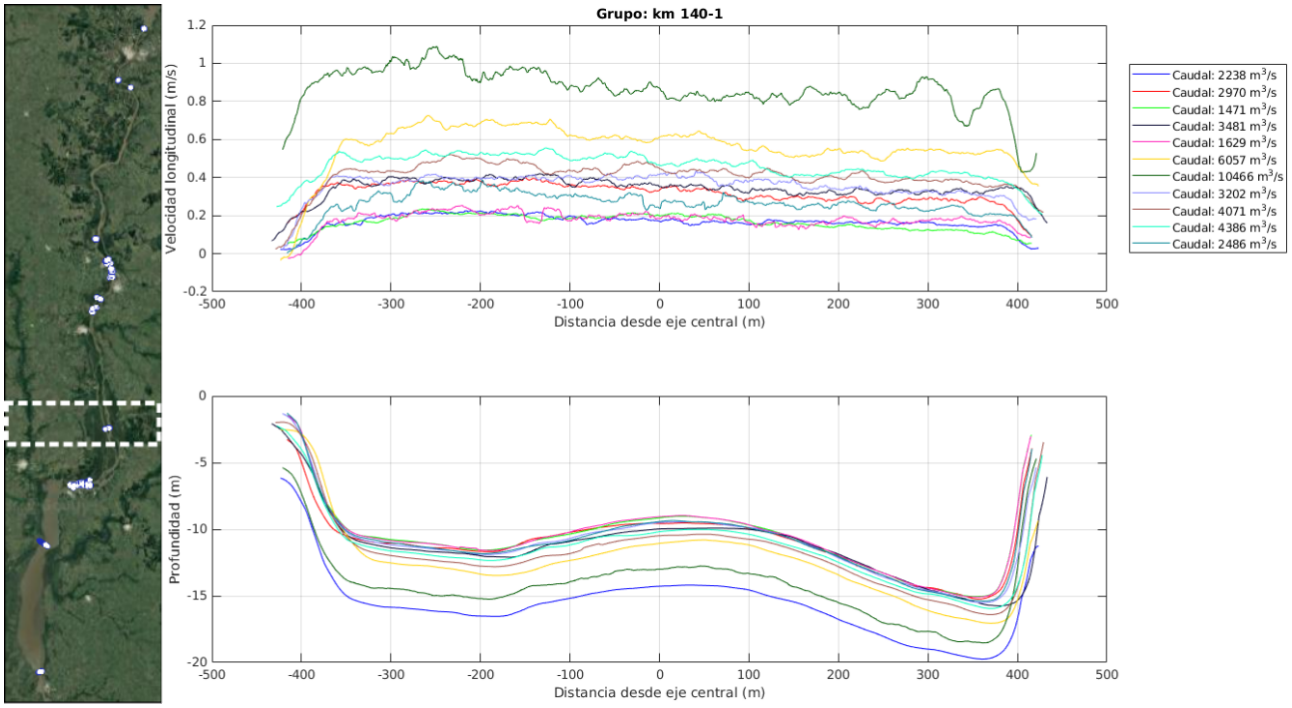


Figura 3.9: Velocidad y profundidad para km 140, brazo Este. Arriba: perfil en planta de velocidad promediada en vertical. Abajo: perfiles del lecho en términos de profundidad.

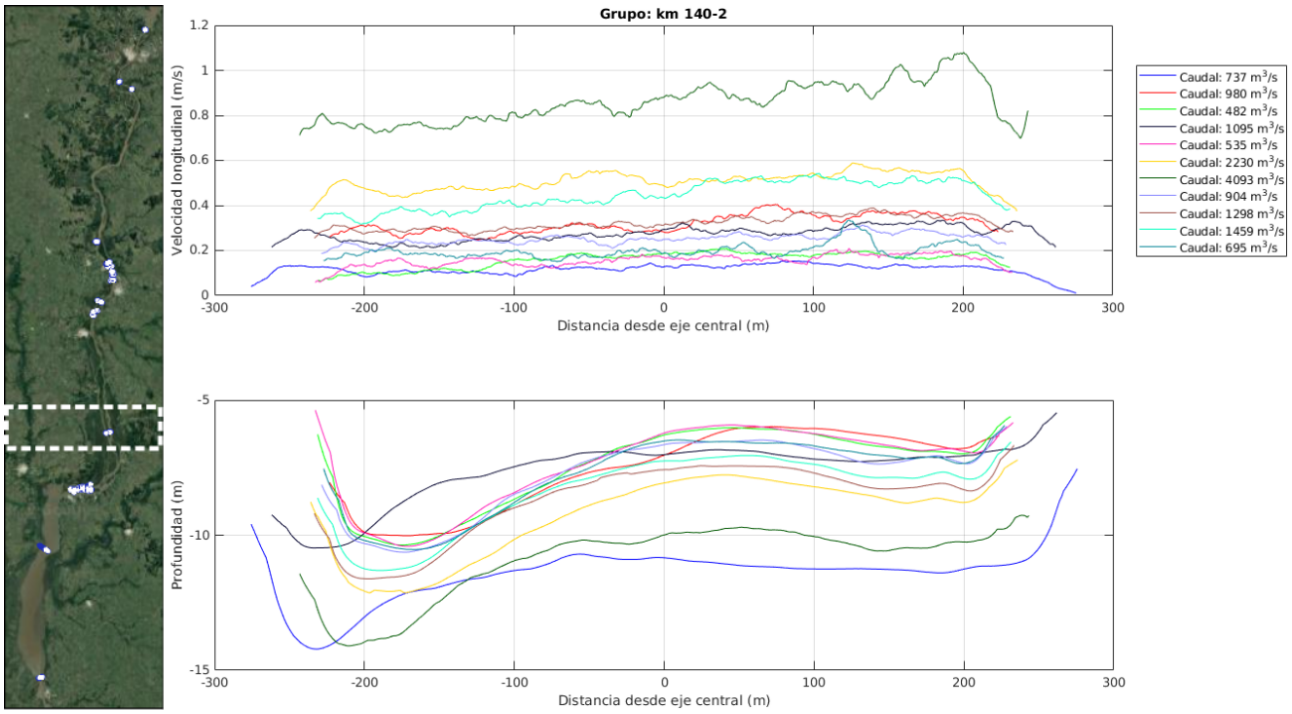


Figura 3.10: Velocidad y profundidad para km 140, brazo Oeste. Arriba: perfil en planta de velocidad promediada en vertical. Abajo: perfiles del lecho en términos de profundidad.

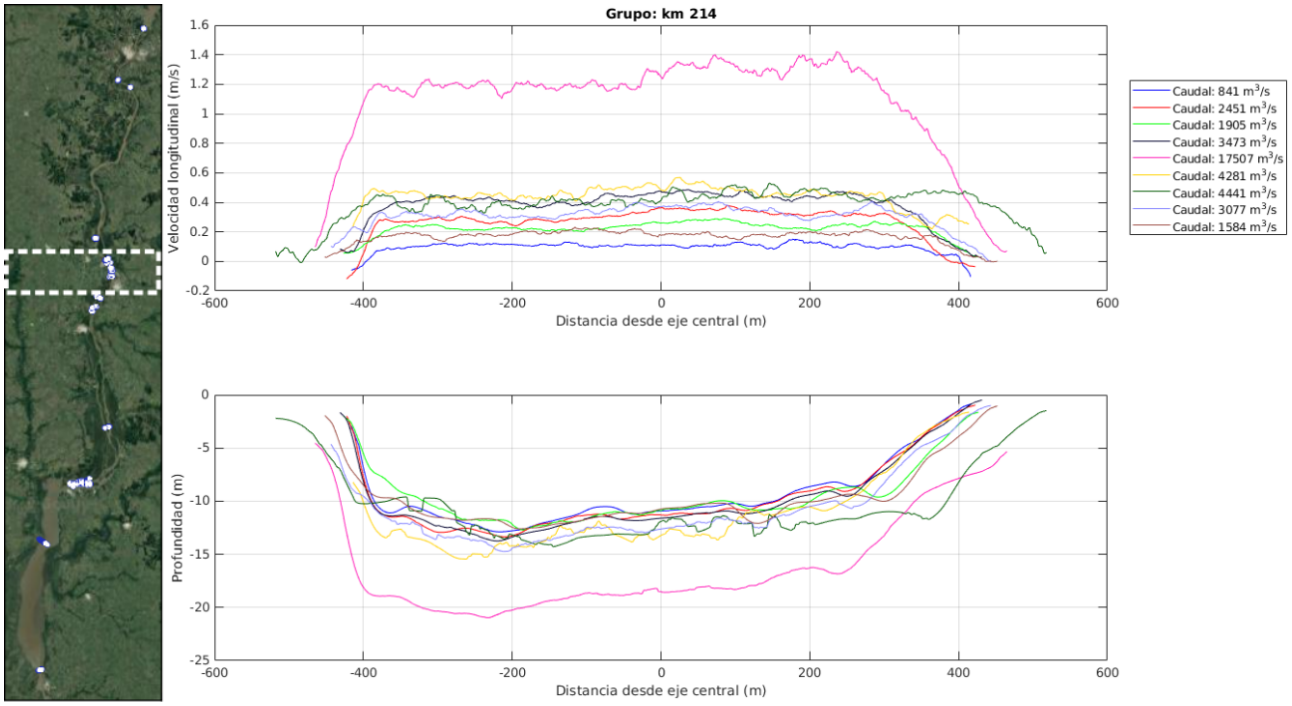


Figura 3.11: Velocidad y profundidad para km 214. Arriba: perfil en planta de velocidad promediada en vertical. Abajo: perfiles del lecho en términos de profundidad.

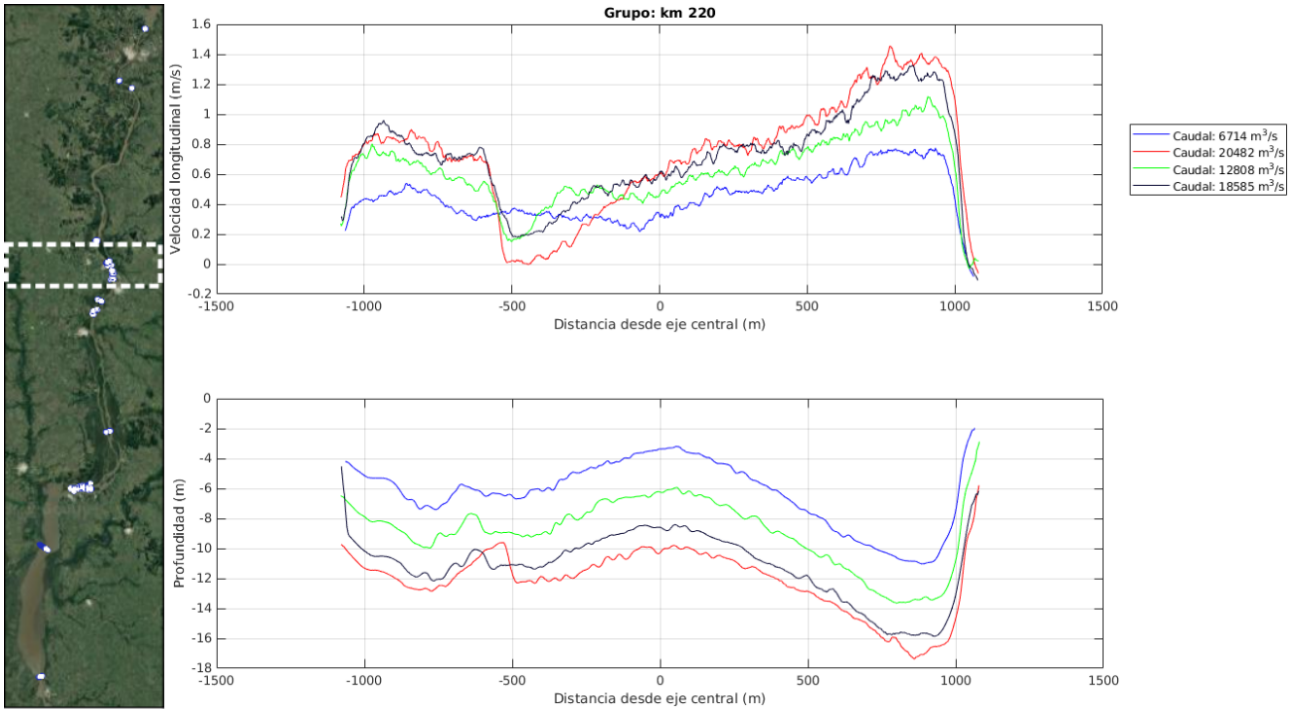


Figura 3.12: Velocidad y profundidad para km 220. Arriba: perfil en planta de velocidad promediada en vertical. Abajo: perfiles del lecho en términos de profundidad.

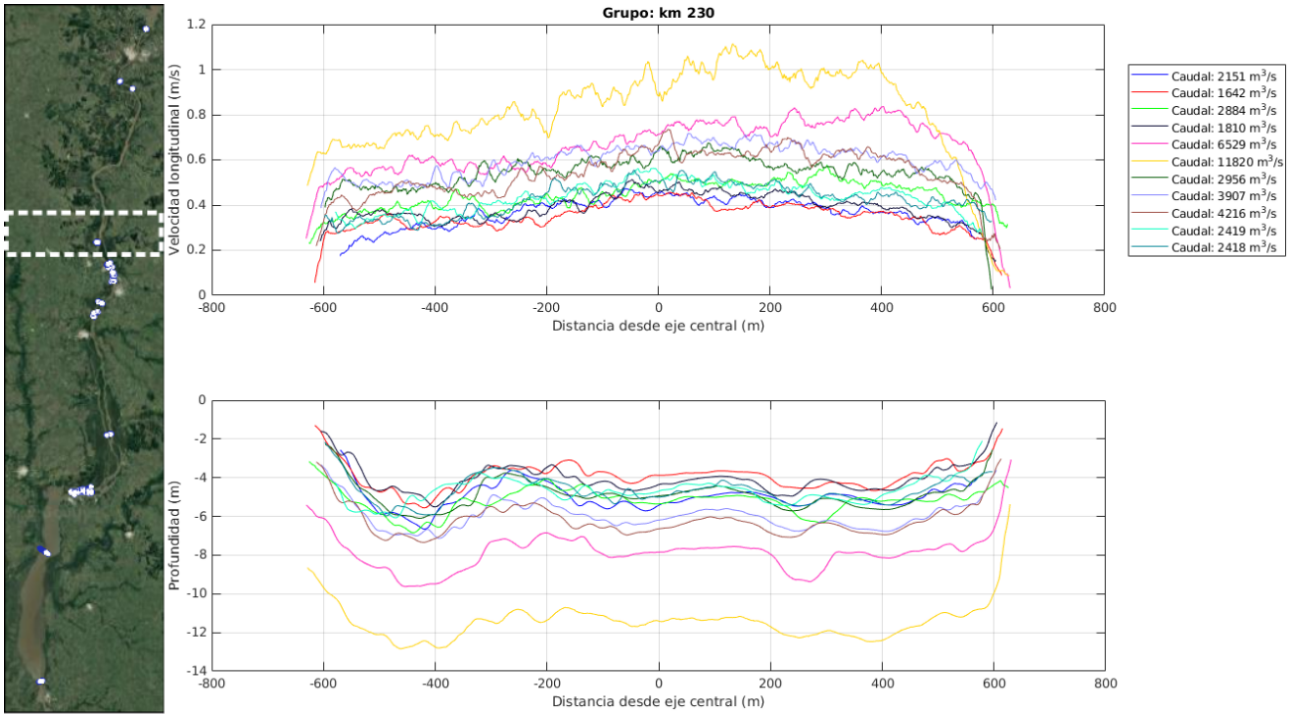


Figura 3.13: Velocidad y profundidad para km 230. Arriba: perfil en planta de velocidad promediada en vertical. Abajo: perfiles del lecho en términos de profundidad.

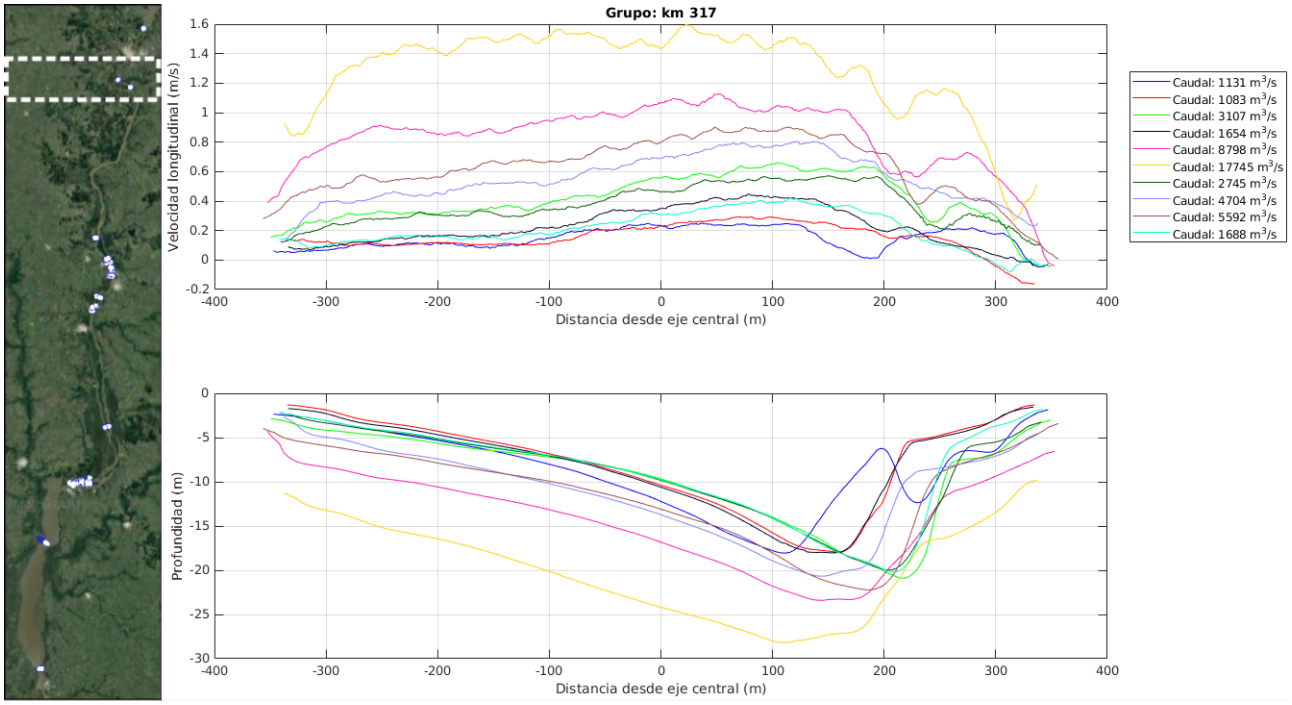


Figura 3.14: Velocidad y profundidad para km 317. Arriba: perfil en planta de velocidad promediada en vertical. Abajo: perfiles del lecho en términos de profundidad.

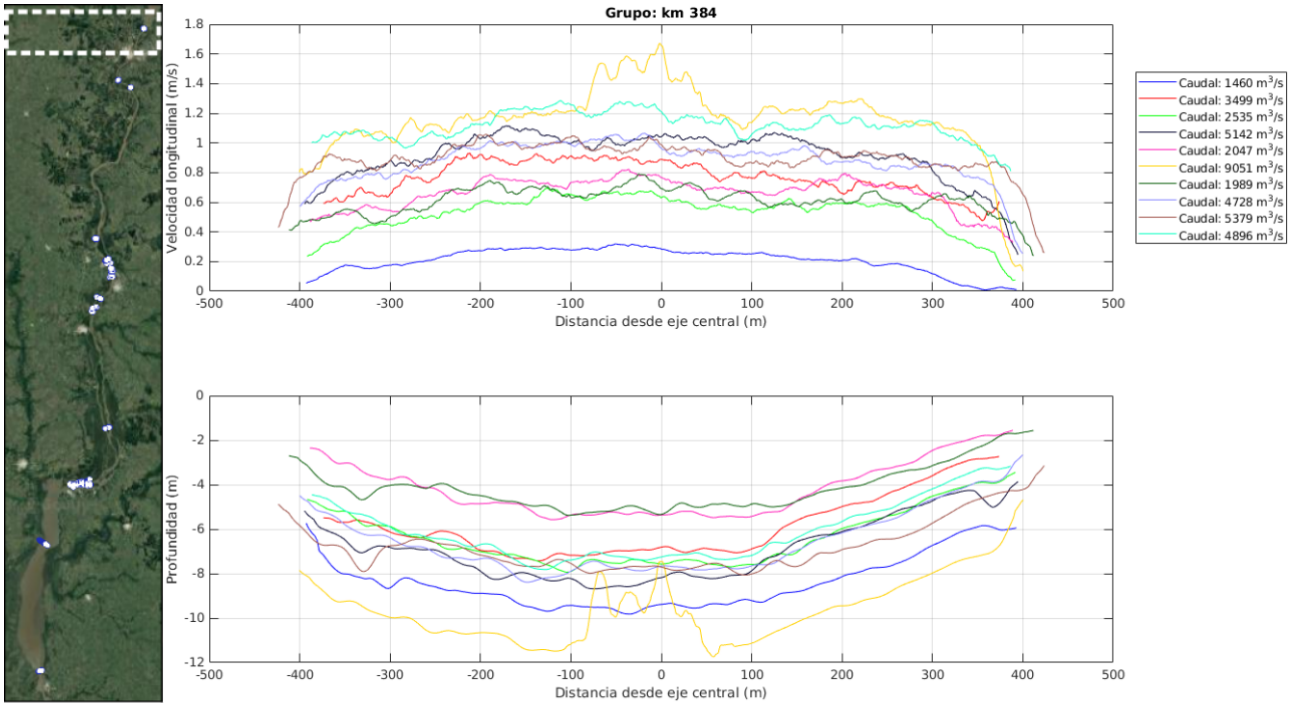


Figura 3.15: Velocidad y profundidad para km 348. Arriba: perfil en planta de velocidad promediada en vertical. Abajo: perfiles del lecho en términos de profundidad.

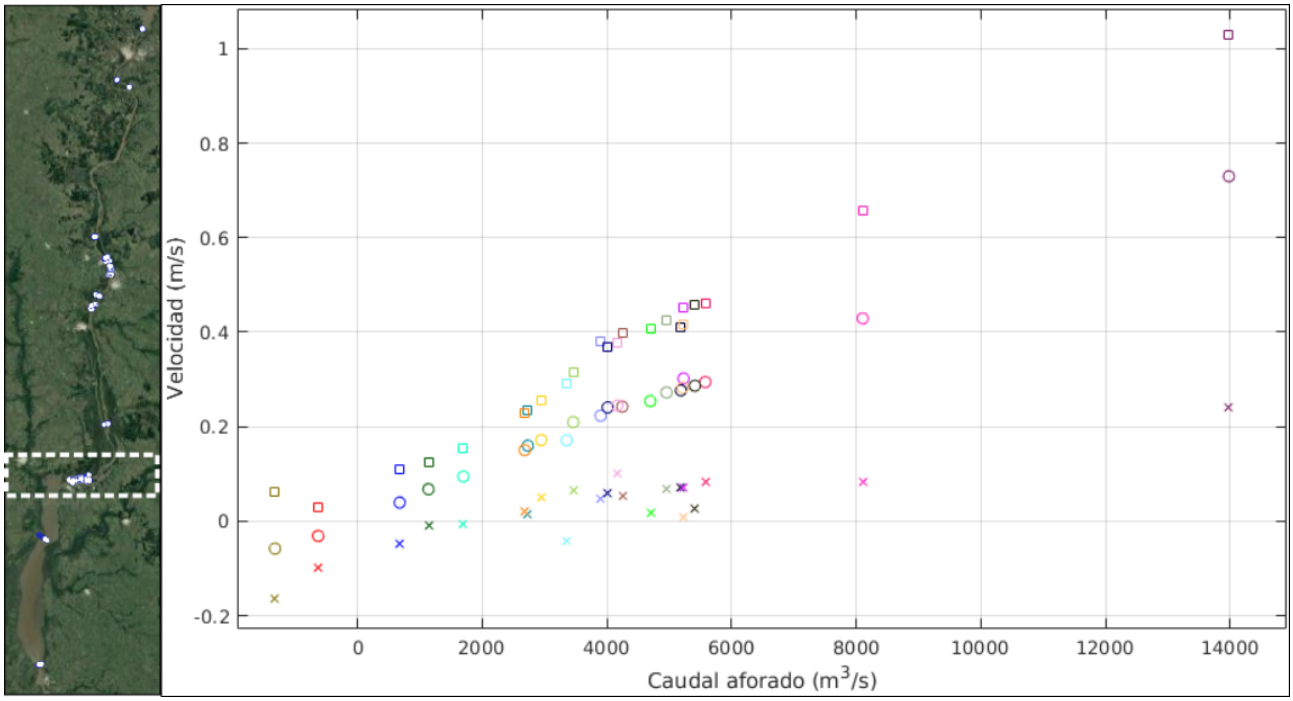


Figura 3.16: Estadísticos de velocidad para km 105: mínima (×), media (○) y máxima (□). Los colores se corresponden con las transectas indicadas en la figura 3.8

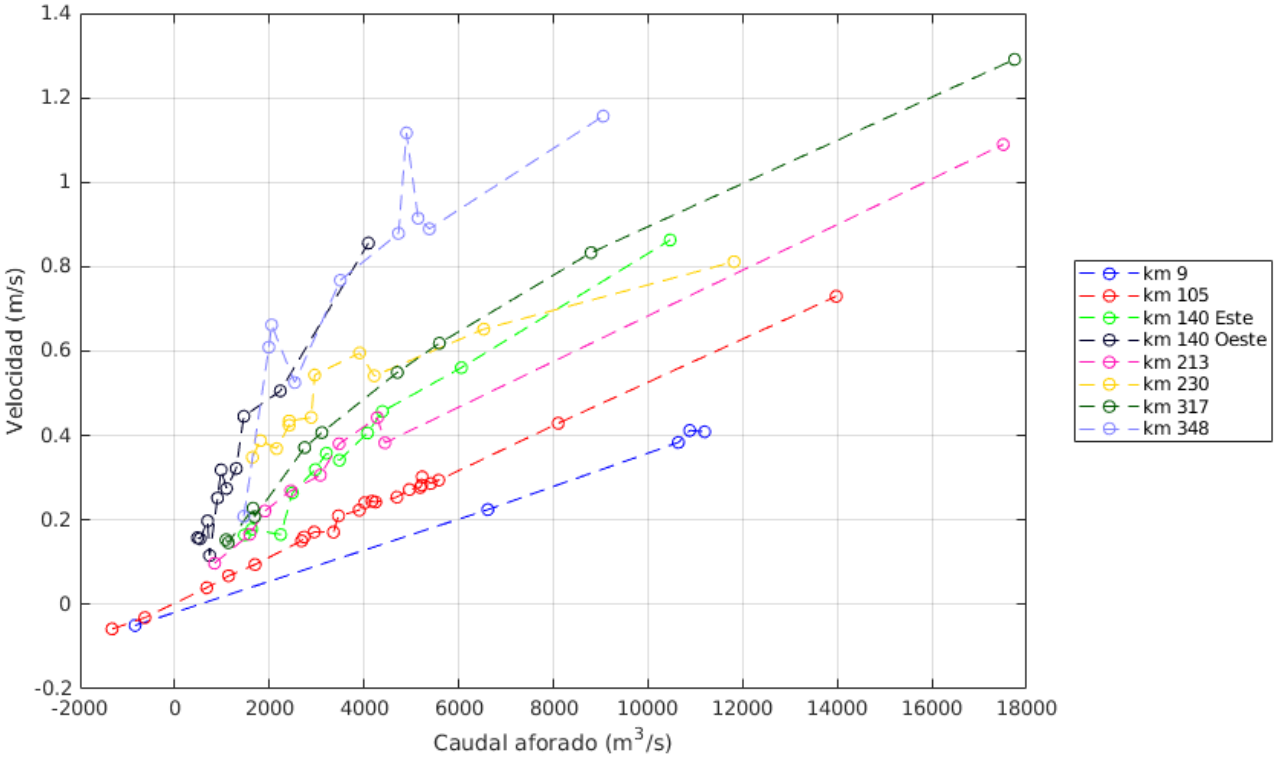


Figura 3.17: Velocidad media medida en la sección en función del caudal aforado, para todos los subgrupos de transectas analizados.

Capítulo 4

Implementación del modelo

En esta sección se describe la implementación del modelo numérico TELEMAC-2D para representar la hidrodinámica del río Uruguay entre la represa de Salto Grande y la desembocadura en el Río de la Plata. Se presenta en primera instancia una descripción del módulo TELEMAC-2D para la simulación de flujos bidimensionales a superficie libre, describiendo luego la información y el proceso para la generación del modelo de terreno y la grilla de cálculo utilizados, y finalmente las condiciones de borde e iniciales para la implementación del modelo.

4.1. TELEMAC-2D

El TELEMAC-2D es una componente de la suite numérica libre y abierta TELEMAC-MASCARET, que resuelve las ecuaciones de flujo a superficie libre promediado en la vertical conocidas como ecuaciones de Saint-Venant, presentadas en el capítulo 2. El TELEMAC-2D permite representar dominios de cálculo utilizando grillas no estructuradas, de elementos triangulares. Los principales resultados en los nodos de la grilla de cálculo son la profundidad del agua y las componentes de la velocidad promediadas en la vertical. El modelo puede tomar en cuenta una gran variedad de fenómenos: propagación de ondas largas, fricción del fondo, efecto de la fuerza de Coriolis, efectos de fenómenos meteorológicos como presión atmosférica, lluvia, evaporación y viento, turbulencia, influencia horizontal de gradientes de temperatura y salinidad en la densidad, secado y mojado de celdas, arrastre y difusión de trazadores por las corrientes, seguimiento de partículas, rotura de presas, fuerzas de arrastre creadas por estructuras verticales, fenómenos de porosidad, corrientes inducidas por oleaje, acoplamiento con transporte de sedimentos y con herramientas de calidad de agua.

El código del TELEMAC-2D resuelve de forma simultanea las ecuaciones de continuidad y de conservación del momento según las dos direcciones en el plano, y conservación de trazadores, ya sean activos, esto es, que tienen un efecto sobre la densidad del agua, o pasivos. En este trabajo no se incluyen trazadores, siendo las variables resueltas por el modelo el nivel de superficie libre

y las componentes del campo de velocidades. Por una discusión en mayor profundidad de los fundamentos teóricos del modelo referirse a Hervouet (2007) y al capítulo 2.

Este modelo ha sido utilizado con anterioridad en el grupo de trabajo dentro del IMFIA para la implementación de modelos hidrodinámicos tanto bidimensionales como tridimensionales del Río de la Plata (Santoro, 2017), por lo cual se cuenta con experiencia de primera mano en el uso del mismo.

4.2. Modelo de terreno

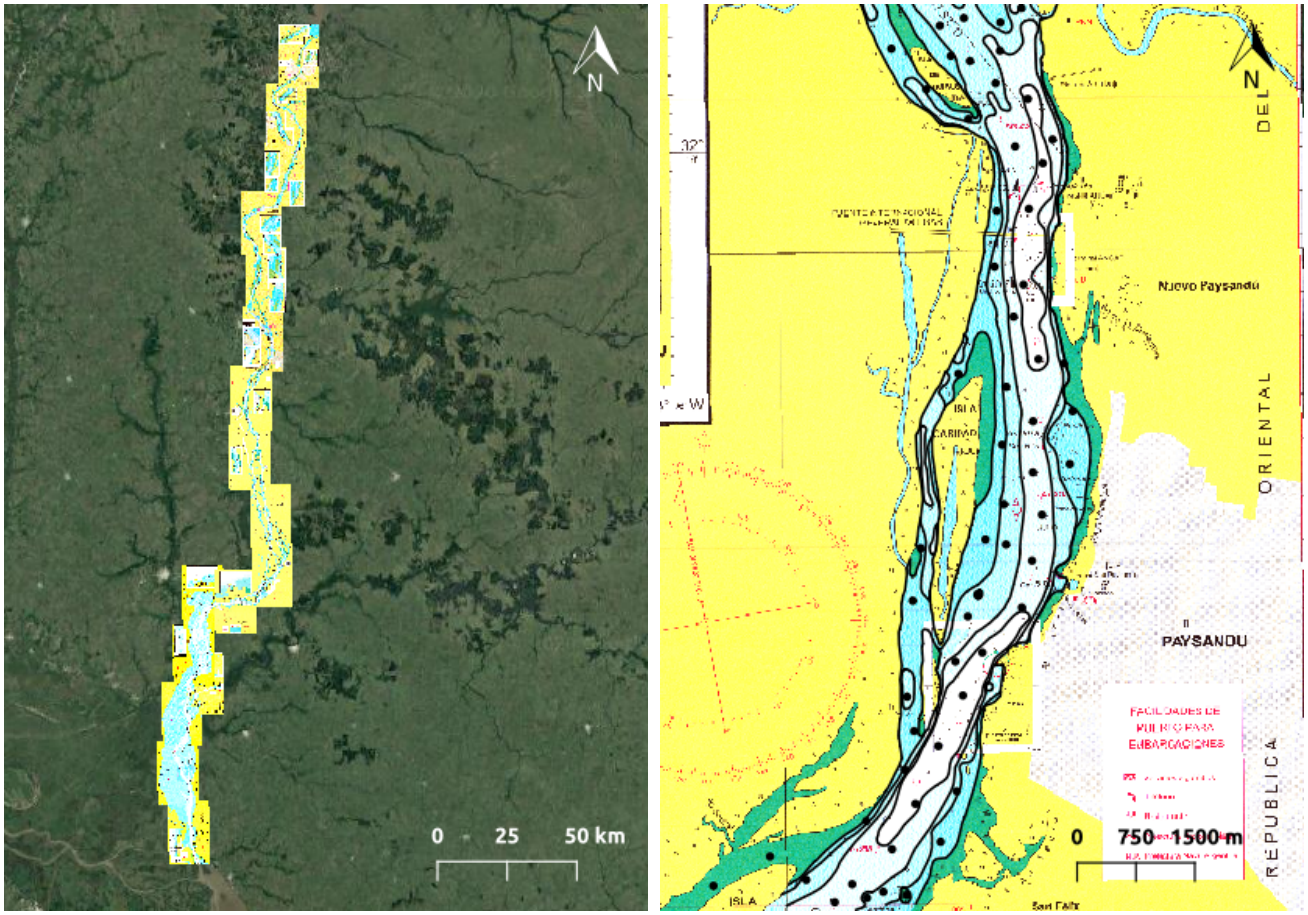
Para la generación de la batimetría del modelo de terreno dentro del cauce del río Uruguay se utilizan como fuentes de información el Atlas Cartográfico del Río Uruguay, series 700, 800 y 900 (SOHMA, 2013a,b, 2015a), datos del proyecto "Levantamiento Integral del Río Uruguay" de la CARU, generados por el SOHMA a instancias del "Levantamiento Hidrográfico del Río Uruguay desde el km 221 al km 284,4" (SOHMA, 2009) y del "Levantamiento Hidrográfico del Río Uruguay desde el km 283 al km 345" (SOHMA, 2015b), datos de campañas de relevamiento batimétrico de pasos de navegación realizadas por la CARU, y datos de profundidad procesados por Melissa Casterá en el marco de su tesis de maestría (Casterá, 2015).

Por su parte, como fuentes de información de elevaciones de terreno fuera del cauce del río se utilizan el modelo digital de terreno del Uruguay generado por la RENARE-MGAP (Dirección General de Recursos Naturales, 2016), el modelo SRTM 1 Arc Second Global (US Geological Survey, 2015), el Modelo Digital de Elevaciones de la República Argentina (Dirección de Geodesia, 2016), y el modelo ALOS Global Digital Surface Model (Tadono et al., 2016).

Los datos obtenidos de las distintas fuentes se procesan para convertirlos a un mismo sistema de coordenadas horizontales (UTM 21 Sur), mientras que sus coordenadas verticales son expresadas en referencia al "Cero Wharton" (indiferentemente "Plano de Referencia Hidrométrico" o PRH).

Se digitaliza y georreferencia la información de las cartas náuticas del río Uruguay de las series 700, 800 y 900 (ver figuras 4.1a y 4.1b a modo de ejemplo), procesando además la información batimétrica suministrada por la CARU, proveniente tanto de relevamientos realizados por el SOHMA (SOHMA, 2009, 2015b) como propios de esa comisión. Esta información se utiliza para complementar a la obtenida de las cartas náuticas, aportando mayor nivel de detalle para el modelo digital de terreno. Luego se procesan e integran todas las fuentes de información para así obtener un modelo batimétrico coherente y consistente.

Cabe destacar que algunas zonas del río presentan vacíos de información batimétrica, no disponibles en las Cartas Náuticas ni en ninguna de las demás fuentes, en las cuales es necesario generar una batimetría aproximada extrapolando valores de zonas con morfología similar, o interpolando los disponibles dentro del cauce con aquellos fuera del cauce. Un ejemplo de lo



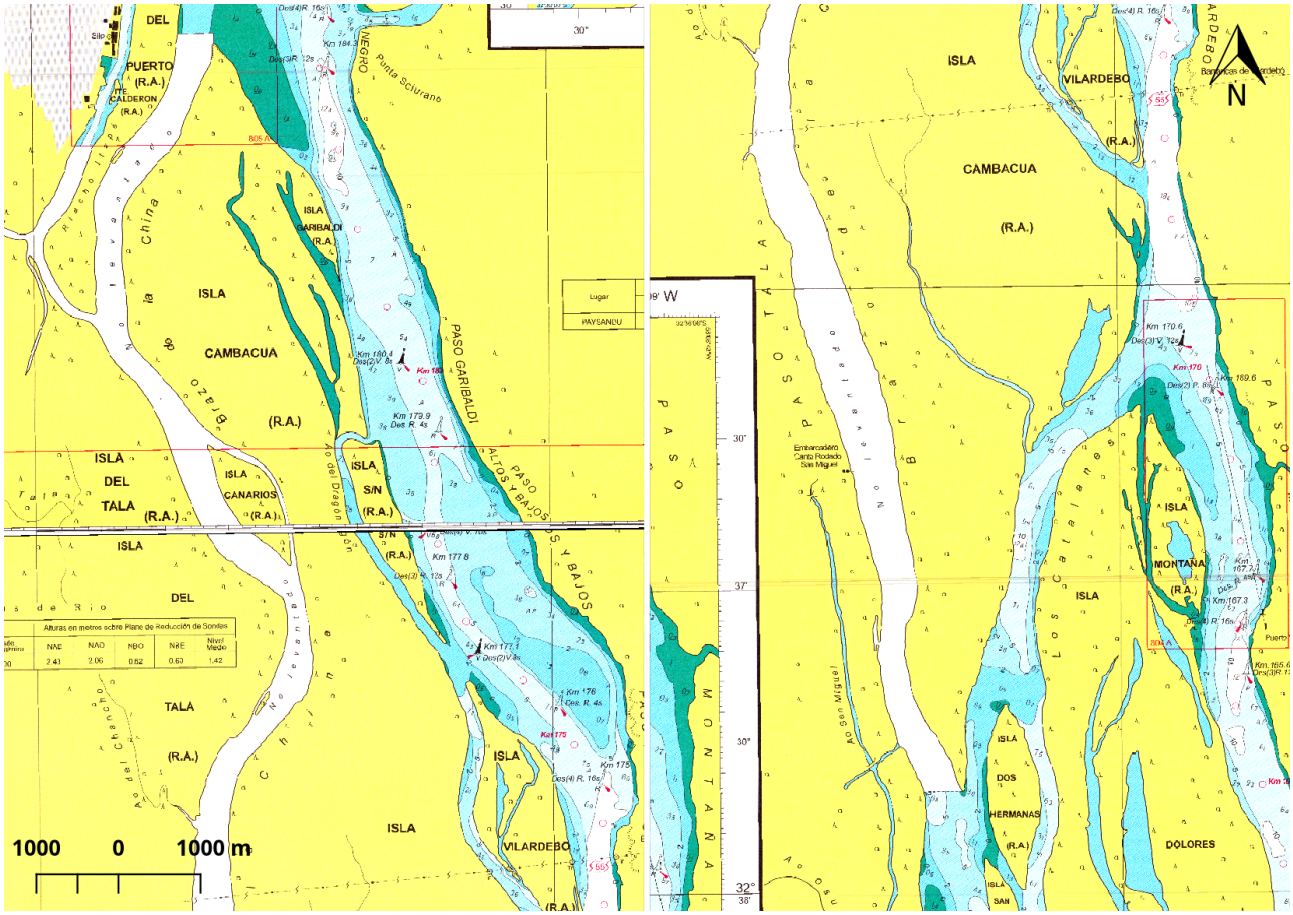
(a) Georreferenciación de cartas náuticas del río Uruguay.

(b) Ejemplo de procesamiento de información de cartas náuticas del río Uruguay.

Figura 4.1: Cartas náuticas del río Uruguay.

anterior, siendo también el caso más relevante, corresponde al brazo Oeste del río ubicado entre la ciudad de Concepción del Uruguay (Argentina), y la localidad de San Javier (Uruguay), el cual se muestra en la figura 4.2. Asimismo, para una zona con contracción de sección, entre las progresivas 170 km y 175 km (que se puede ver en la esquina superior derecha de la figura 4.2), es necesario aumentar la profundidad de la batimetría obtenida de la interpolación de los datos, dado que las cartas cuentan con un único dato puntual por debajo de los 10 m de profundidad. Para esto se utiliza el valor de este punto, de 18,6 m, para asignar un valor de profundidad al canal dentro de esa zona.

Se procesa la información de elevación del terreno aledaño al río Uruguay, tanto en la margen argentina como en la uruguaya, tomando como insumo los modelos de terreno mencionados anteriormente. De este procesamiento se obtienen nubes de puntos con datos de elevación del terreno, que en conjunto con los datos de batimetría, se utilizan para generar un modelo de terreno que incluya la planicie de inundación.


PUERTO
(R.A.)
CALDERON
(R.A.)
ISLA
CAMBACUA
(R.A.)
ISLA
DEL
TALA
(R.A.)
ISLA
CANARIOS
(R.A.)
ISLA
S/N
(R.A.)
ISLA
GARIBALDI
(R.A.)
PASO GARIBALDI
ALTOS Y BAJOS
Punta Sciurano
Canal Chino
Canal del Dragón
Canal Martín García
Canal Arroyo Palmar
Canal Arroyo Chanqueo
Canal Arroyo Barquín
Canal Arroyo Pelay
Canal Arroyo Molino
Canal Arroyo Pelay Grande
Canal Arroyo Molino Viejo
Canal Arroyo Pelay Chico
Canal Arroyo Barquín Chico
Canal Arroyo Molino Chico

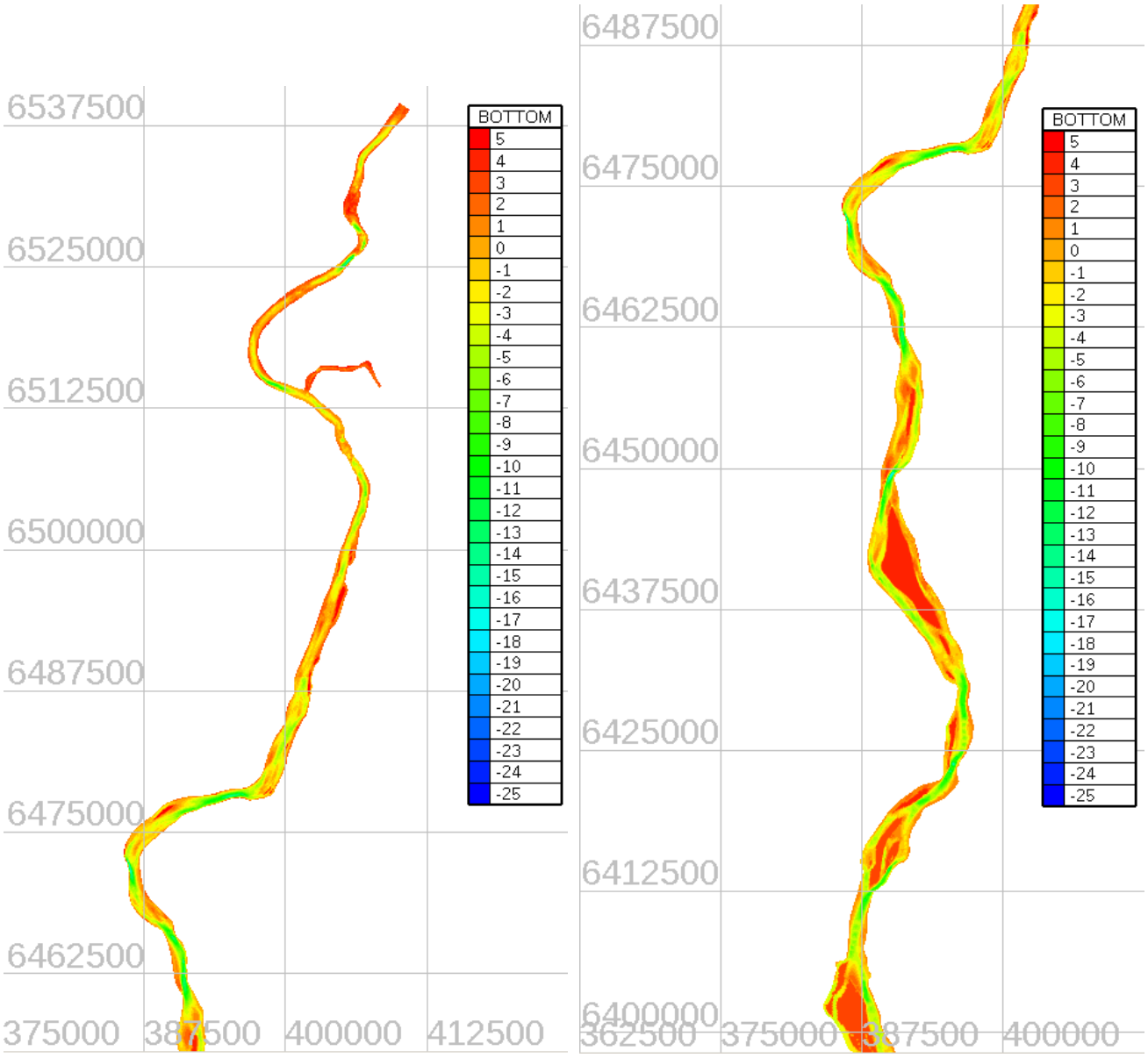
4.3. Grilla de cálculo

Para la implementación del modelo se genera una grilla de cálculo con el software Blue Kenue (Barton, 2019) en base a sub-grillas por tramos, añadiéndolas secuencialmente para extender el dominio. Se genera primero una grilla desde Salto Grande a Concepción del Uruguay (tramo 1), a la que luego se le añade el tramo desde Concepción del Uruguay a Fray Bentos (tramo 2), para finalmente agregar la grilla desde Fray Bentos al Río de la Plata (tramo 3). Cada uno de estos tramos cuenta a su vez con sus propias sub-grillas, las cuales se generan tomando en cuenta los siguientes criterios: Para las grillas correspondientes al canal se utiliza un algoritmo específico para canales, en el cual se definen las márgenes de este, la dimensión de los elementos en el sentido longitudinal del mismo, y el número de elementos en sentido transversal. Se considera una dimensión en sentido longitudinal de 150 m, mientras que el número de elementos en sentido transversal se determina de modo de contar con una mayor resolución espacial en las contracciones del cauce con concentración de flujo, de entre 20 a 50 m. Las grillas de los canales se unen con grillas irregulares de elementos triangulares con densidad variable, compatible con la densidad de las grillas a unir; Para las áreas correspondientes a las islas se utilizan grillas irregulares de elementos triangulares de densidad variable, con lados de longitud máxima de 150 m, compatible con la dimensión de los bordes de elementos de las grillas de los cauces en el sentido longitudinal de los mismos. La grilla global cuenta con un total de 89.641 nodos y 173.937 elementos.

Se realiza la interpolación de los datos batimétricos descritos en la sección 4.2 para obtener la cota de fondo en cada nodo. La utilización de datos de elevación tanto dentro como fuera del cauce del río permite mejorar la interpolación de las elevaciones en la zona de transición entre agua y tierra, así como cubrir las zonas de la malla que queden en la planicie de inundación. Las cotas se expresan en referencia al cero PRH. La batimetría ingresada al modelo en cada elemento se puede ver en las figuras 4.3 y 4.4. En la figura 4.5 se puede ver un acercamiento a las grillas de dos zonas a modo de ejemplo.

4.4. Condiciones de borde e iniciales

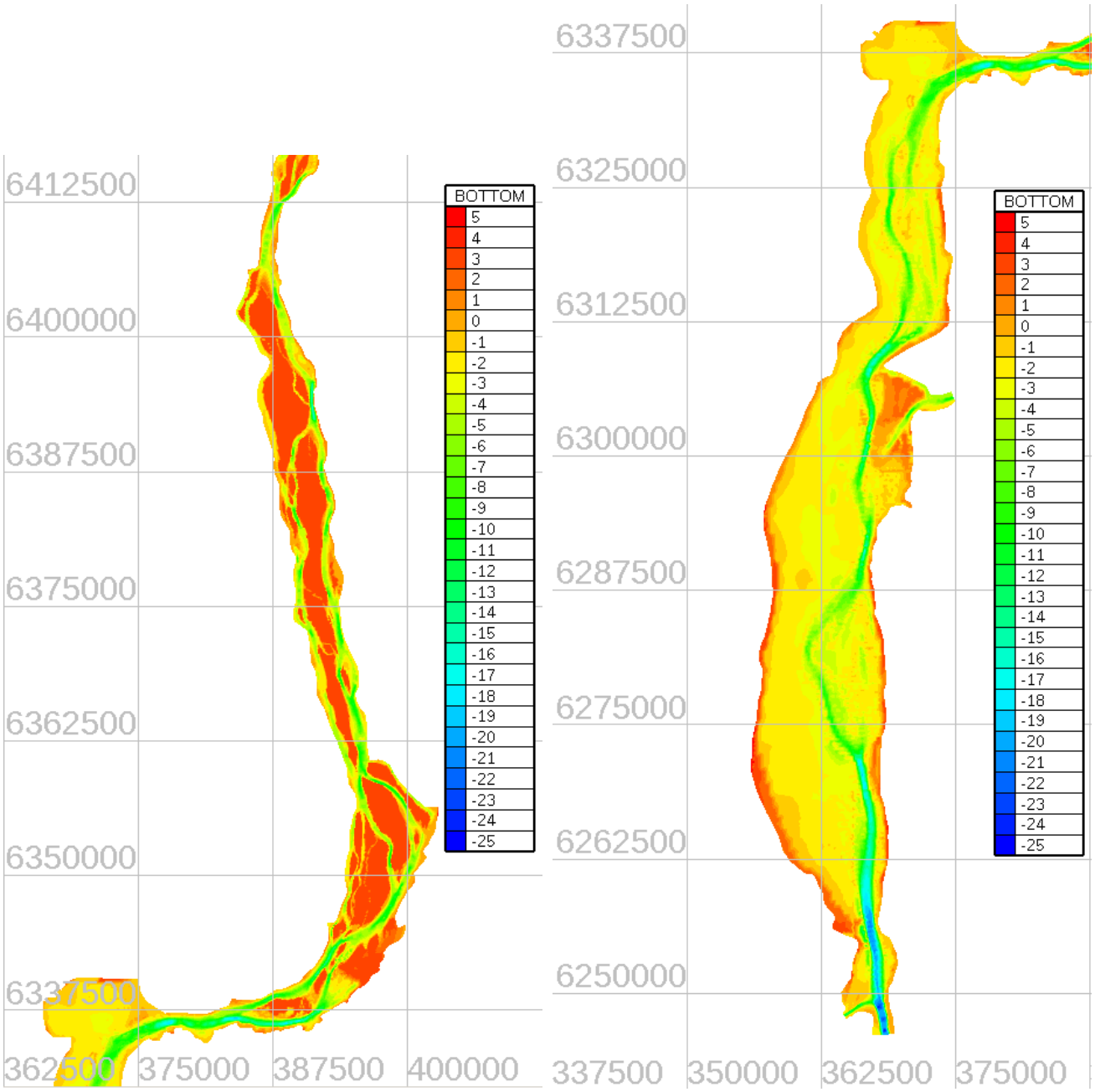
Las condiciones de borde utilizadas corresponden a series temporales de niveles de superficie libre así como caudales de afluentes. Se incluye asimismo la fricción de fondo en términos de la Ley de Manning (ecuación 4.1, donde U es la velocidad media, R_h el radio hidráulico, S_0 la pendiente de fondo y n el coeficiente de fricción); y la tensión del viento en la superficie libre, calculada en función de las componentes campo de viento a 10 m de altura (U_{viento} y V_{viento}) según se muestra en las ecuaciones 4.2 y 4.3, donde ρ_{aire} es la densidad del aire y ρ_{agua} la del agua, h la profundidad, y a_{viento} el coeficiente de interacción con el viento (Hervouet, 2007).



(a) Tramo 1.

(b) Zona Norte del Tramo 2.

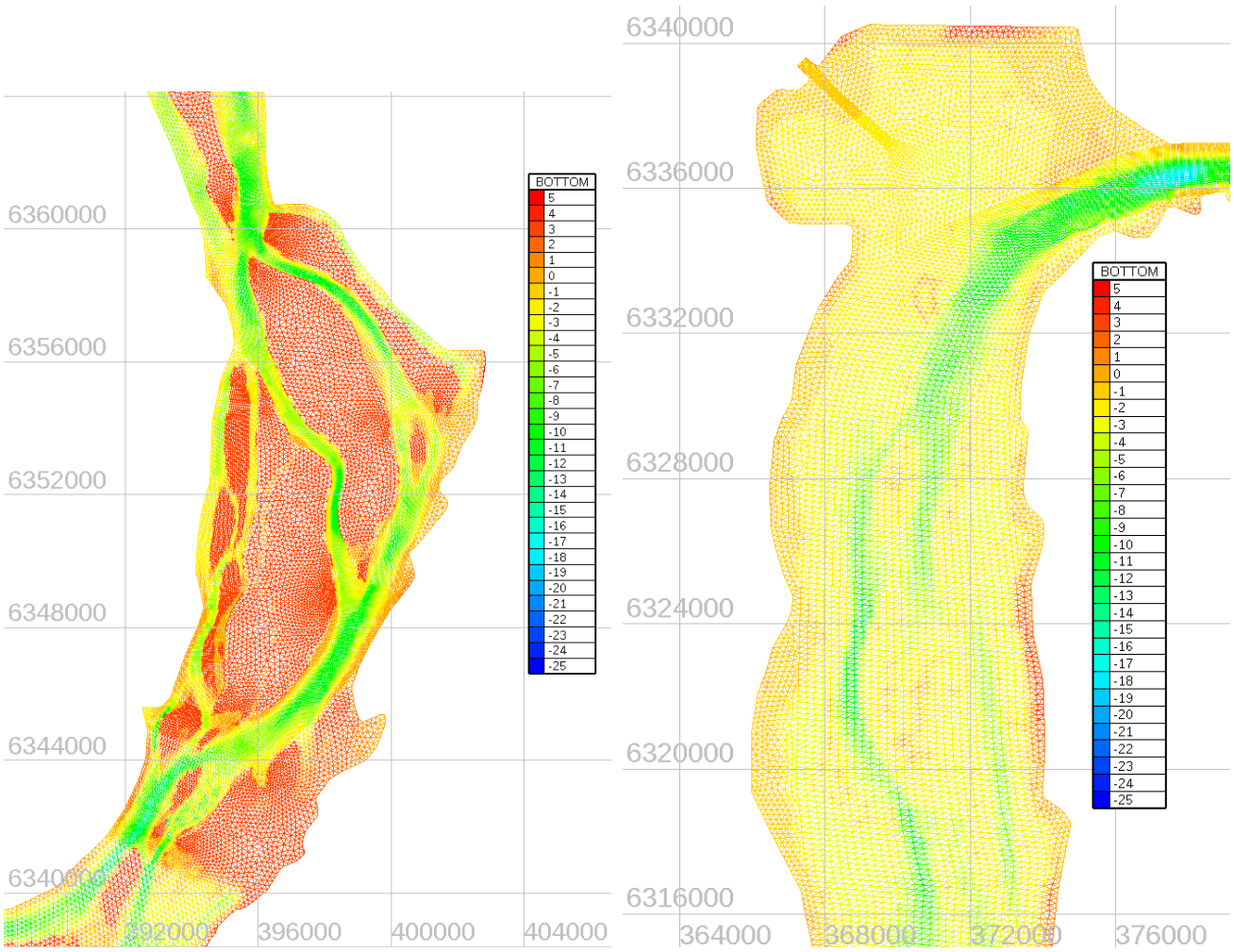
Figura 4.3: Grilla y modelo de terreno Tramo 1 y zona Norte del Tramo 2 (coordenadas en m UTM 21 S y cotas verticales referidas al PRH).



(a) Grilla y modelo de terreno de la zona Sur del Tramo 2.

(b) Grilla y modelo de terreno del Tramo 3.

Figura 4.4: Grilla y modelo de terreno de la zona Sur del Tramo 2 y Tramo 3 (coordenadas en m UTM 21 S y cotas verticales referidas al PRH).



(a) Zona Sur del Tramo 2.

(b) Zona Norte del Tramo 3.

Figura 4.5: Acercamiento a grilla de cálculo.

Como cierre de las ecuaciones de turbulencia se utiliza el modelo de Smagorinski (ver capítulo 2, ecuación 2.42, con $C_s = 0,1$).

$$U = \frac{1}{n} R_h^{2/3} S_0^{1/2} \tag{4.1}$$

$$F_x^v = \frac{1}{h} \frac{\rho_{aire}}{\rho_{agua}} a_{viento} U_{viento} \sqrt{U_{viento}^2 + V_{viento}^2} \tag{4.2}$$

$$F_y^v = \frac{1}{h} \frac{\rho_{aire}}{\rho_{agua}} a_{viento} V_{viento} \sqrt{U_{viento}^2 + V_{viento}^2} \tag{4.3}$$

Específicamente, se consideran las siguientes condiciones de borde para la grilla de cálculo utilizada, las cuales se pueden ver en la figura 4.6 (cabe observar que el modelo automáticamente interpola linealmente los datos ingresados en las condiciones de borde de nivel y caudal, de modo de generar una serie con el mismo paso temporal que el utilizado en el cálculo, independientemente del paso temporal de los datos originales): frontera abierta con caudal impuesto en la represa de Salto Grande, datos de caudal con frecuencia horaria; frontera abierta con caudal impuesto en el río Daymán, datos de caudal con frecuencia diaria; frontera abierta con caudal impuesto en el río Negro, datos de caudal con frecuencia diaria; frontera abierta con caudal impuesto en el río Gualeguaychú, datos de caudal con frecuencia diaria; frontera abierta con caudal impuesto en el río Paraná Bravo, datos de caudal con frecuencia diaria; frontera abierta con nivel impuesto en el cierre en Nueva Palmira, datos de nivel con frecuencia horaria; el resto de la frontera se consideró cerrada, como pared vertical sin fricción.

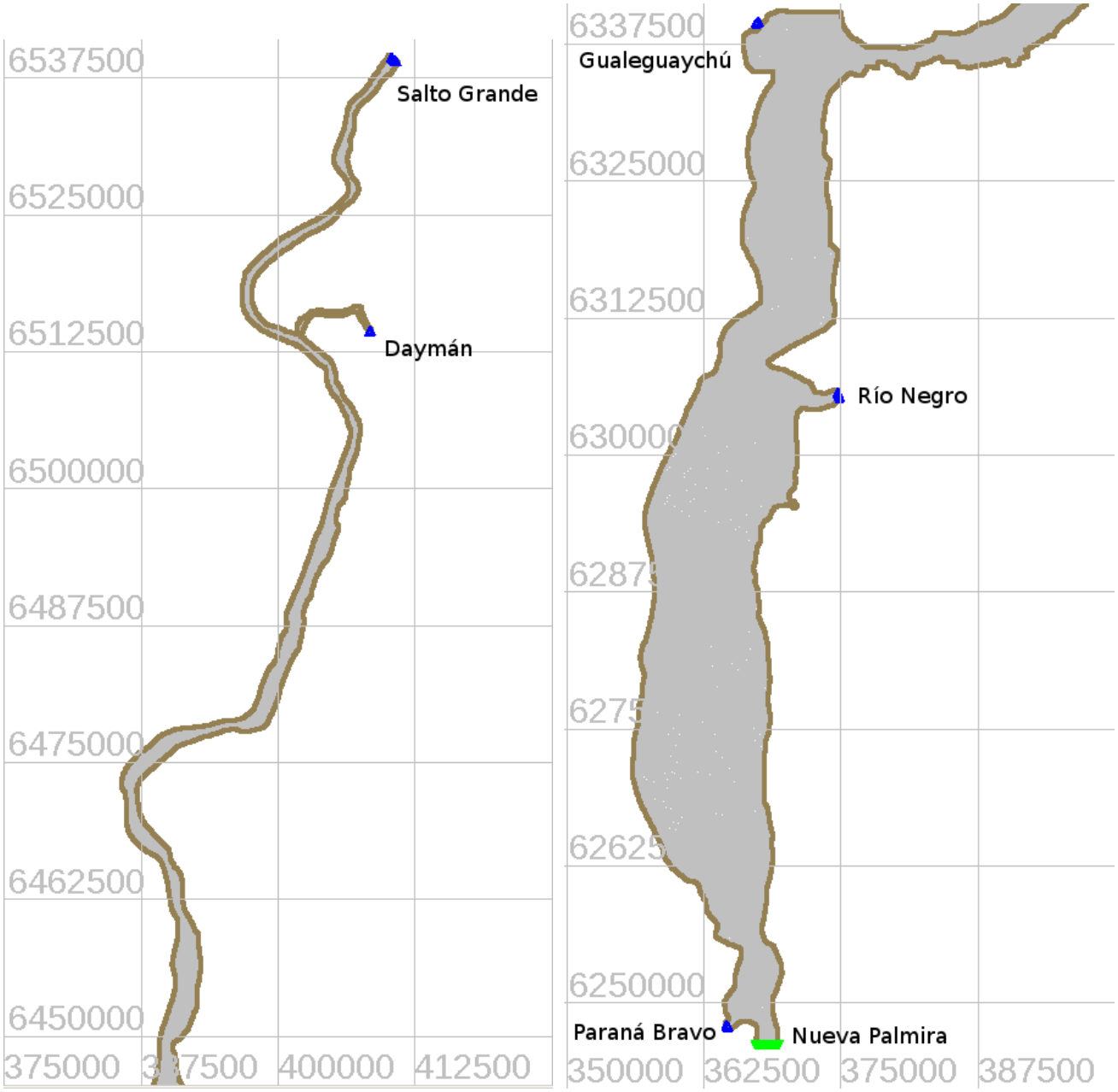
Se realizan varias simulaciones de prueba del modelo en situación estacionaria, ingresando distintos valores de caudal y nivel en las condiciones de contorno, de modo de abarcar el espectro de posibilidades surgido del análisis de la información de base. De este modo se verifica la estabilidad del modelo para las posibles situaciones a simular, yendo incluso a valores de caudal más altos que los presentes en las series temporales de esta variable utilizadas para las condiciones de contorno.

Las simulaciones de prueba permiten además optimizar la configuración general del modelo, minimizando el tiempo de cálculo sin comprometer la calidad de los resultados. De estas pruebas se tiene que la configuración más adecuada corresponde a la utilización de la ecuación de onda en vez de las ecuaciones originales, la cual se resuelve mediante el método de error mínimo, utilizando un paso de tiempo de 6 s para el cálculo, y dividiendo la grilla en 10 subdominios en los cuales se hacen los cálculos en paralelo (Hervouet, 2007). En estas condiciones se logra simular la hidrodinámica correspondiente a un año en 50 horas, util‘izando una computadora con un procesador Intel Core i9-7900X de 10 núcleos y 16 GB de RAM.

Para las condiciones iniciales se utilizan los campos de nivel de superficie libre y velocidades resultado de una simulación realizada en condiciones estacionarias con una caudal en Salto

Grande de 5.500 m^3/s, de 820 m^3/s en el Río Negro, de 100 m^3/s en el Daymán, de 100 m^3/s en el Gualeguaychú y de 500 m^3/s en el Paraná Bravo, imponiendo a su vez un nivel de superficie libre constante de 1,8 m PRH en Nueva Palmira.

Los datos de viento utilizados corresponden a los del "Climate Forecast System Reanalysis" (CFSR). El CFSR es un modelo global de alta resolución que acopla atmósfera, océano, tierra y hielo oceánico, siendo una de sus componente el "Cross-Calibrated Multi-Platform Wind Vector Analysis" (CCMP), modelo de viento global que cuenta con una resolución espacial de $0,25^o$ por $0,25^o$ y con paso temporal de 3 horas (Saha et al., 2010). Los datos obtenidos de esta fuente se interpolan a la grilla de cálculo del modelo, obteniendo un campo de velocidades de viento variable en tiempo y espacio. En la figura 4.7 se presenta a modo de ejemplo el campo de viento interpolado a la grilla de cálculo en el último tramo del río Uruguay para la fecha 30/1/2005 a las 13:00 horas.



(a) Condiciones de borde en tramo 1.

(b) Condiciones de borde en tramo 3.

Figura 4.6: Condiciones de contorno impuestas (en color azul se indican las fronteras abiertas con caudal impuesto, en color verde las que tienen nivel impuesto y en ocre las cerradas).

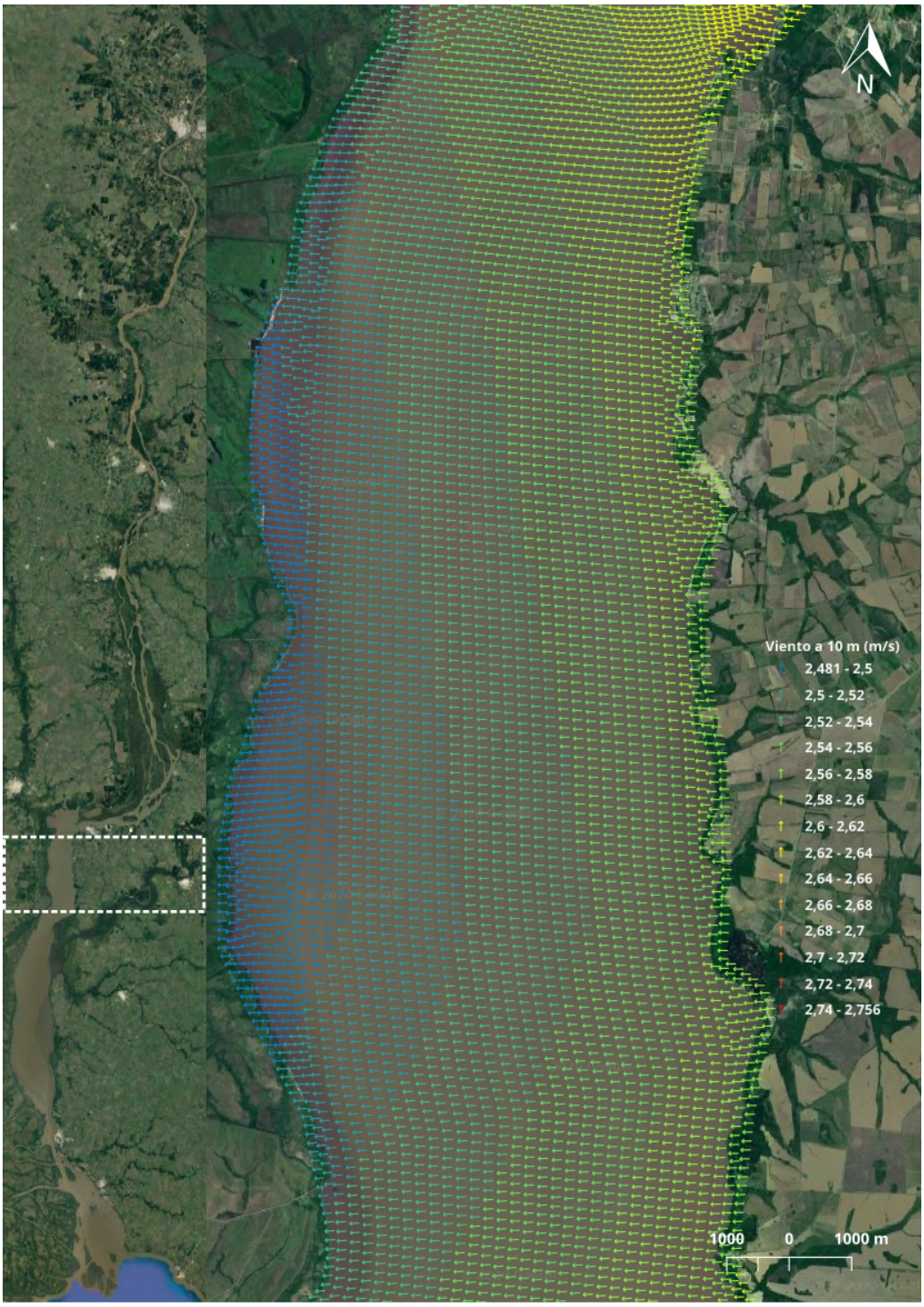


Figura 4.7: Campo de viento a 10 m de altura interpolado en la malla del modelo en base a datos del CFSR para el 1/1/2005 a las 00:00 horas. En el mapa global del río Uruguay (panel izquierdo) se señala con un rectángulo blanco la ubicación del acercamiento mostrado en el panel derecho.

Capítulo 5

Calibración y validación del modelo

5.1. Metodología

El modelo se calibra en base a la comparación de series de nivel medidas y simuladas en 13 estaciones hidrométricas a lo largo del río (ver sección 3.1), utilizando como parámetros de calibración el coeficiente de fricción de fondo de Manning y el de influencia del viento. A los efectos de la asignación de valores al coeficiente de fricción de fondo del canal principal se consideran tres tramos distintos de acuerdo a su morfología:

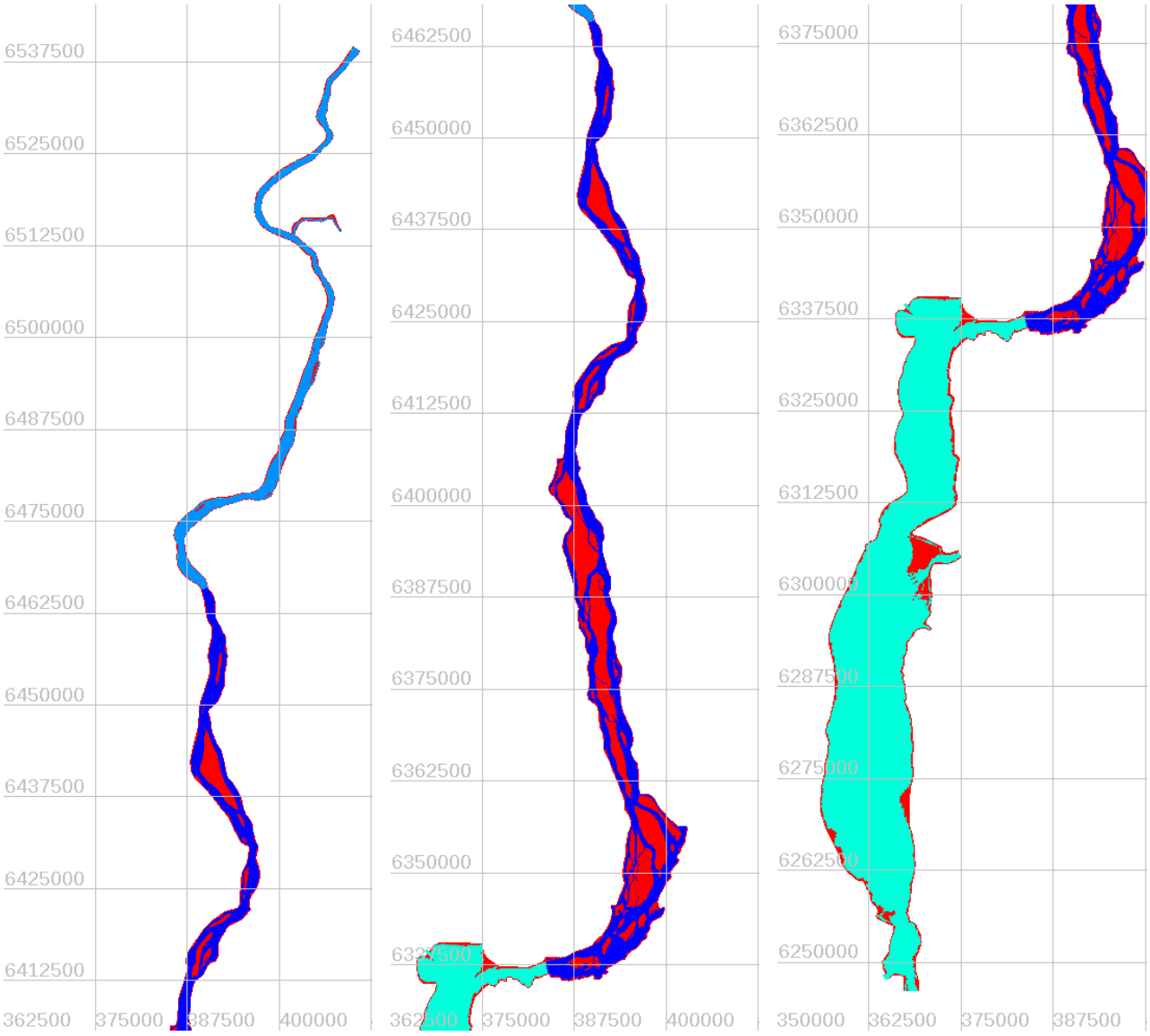
- Tramo 1: desde Salto Grande hasta la progresiva 254 km, caracterizado por un canal bien marcado, con un cauce estrecho en relación al resto del río, con ausencia de islas.
- Tramo 2: desde el final del Tramo 1 hasta la ciudad de Fray Bentos, en la progresiva 105 km, caracterizado por la presencia de islas que separan al río en varios brazos.
- Tramo 3: desde el final del Tramo 2 hasta el límite con el Río de la Plata, caracterizado por la ausencia de islas y un ensanchamiento del cauce del orden de 10 veces respecto a los tramos anteriores.

Se consideran además las islas presentes en el río así como la porción de planicie de inundación incluida en el dominio de cálculo, a las cuales se les asigna un valor de coeficiente de fricción uniforme. Este esquema se puede visualizar a modo de ejemplo en la figura 5.1. El coeficiente de influencia del viento se considera uniforme en todo el dominio de cálculo.

Para la calibración se procede en tres etapas, según se describe a continuación:

1. Calibración del coeficiente de fricción del cauce en los distintos tramos (ver ejemplo en figura 5.1), para lo cual se utilizan datos de caudales bajos y medios de Salto Grande, específicamente desde el 1/1/2008 hasta el 1/10/2008. En estas condiciones, el flujo se mantiene dentro del cauce, no mojando las islas ni la planicie de inundación.

2. Calibración del coeficiente de fricción para las islas y planicie de inundación, para lo cual se utilizan datos de caudales de crecidas, específicamente entre el 15/10/2008 y el 20/11/2008.
3. Calibración del coeficiente de influencia del viento, para lo cual se utilizan los valores calibrados de coeficientes de fricción del cauce, planicie e islas, con datos de condiciones de contorno entre el 1/9/2008 y el 31/12/2008.



(a) Ejemplo de coeficientes de fricción en tramo 1.

(b) Ejemplo de coeficientes de fricción en tramo 2.

(c) Ejemplo de coeficientes de fricción en tramo 3.

Figura 5.1: Ejemplo de esquema de asignación de coeficientes de fricción de fondo en los distintos tramos, islas y planicie de inundación (los distintos colores indican 4 valores diferentes del coeficiente de fricción).

En la figura 5.2 se pueden ver las series de datos utilizadas para estos períodos en términos

de caudales y niveles, mientras que en la figura 5.3 se puede ver un ejemplo de series de viento.

Para la selección de los coeficientes de fricción de fondo y de interacción con el viento al momento de la calibración, se consideran los siguientes criterios:

- Comparación gráfica entre series medidas y modeladas: se busca que la modelación se aproxime lo más posible a las series de niveles medidas en las estaciones a lo largo del cauce, lo cual se verifica con una comparación gráfica de las mismas.
- Diagramas de Taylor para comparación estadística (Taylor, 2001): estos diagramas permiten 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. La serie contra la que se compara, esto es, la serie medida, corresponde al punto indicado como "A", mientras que las series simuladas toman los nombres de las siguientes letras del alfabeto. Mientras más cerca del punto "A" se encuentre el punto correspondiente a una serie simulada, mejor será su ajuste a la serie de comparación.
- Gráficos individuales de ERMS, coeficiente de correlación y sesgo, visualizados tanto por estaciones como por simulación.
- Determinación de un indicador definido como $IND = (ERMS + abs(SESGO))/(CORCOEF \times STD)$ (siendo $abs(SESGO)$ el valor absoluto del sesgo, entendido como la diferencia entre las medias de las series temporales modelada y medida) para cada estación y del promedio de este indicador entre todas las estaciones para cada combinación de coeficientes de fricción. Cuanto menor sea el valor de este indicador, mejor será el ajuste del modelo a las series medidas.

Para la validación del modelo se simula el año 2005 en su totalidad. Las series de caudales y niveles utilizadas como forzantes se presentan en la figura 5.4. A modo ilustrativo se presentan las series de viento para las estaciones de Salto, Fray Bentos y Nueva Palmira en la figura 5.5, extraídas del campo vectorial utilizado.

La validación del modelo se lleva a cabo en base a la comparación de las series de niveles simuladas y medidas para las 13 estaciones ubicadas a lo largo del tramo de río modelado (ver figura 3.1a). Para esto se utilizan parte de las herramientas aplicadas para la calibración, específicamente el diagrama de Taylor (Taylor, 2001) y la comparación gráfica de las series temporales. Se realiza asimismo una comparación cualitativa de las velocidades obtenidas del modelo con los datos medidos por ADCP. Esta comparación se realiza a través de gráficos de dispersión de velocidad-caudal para velocidad máxima, media y mínima en una sección dada.

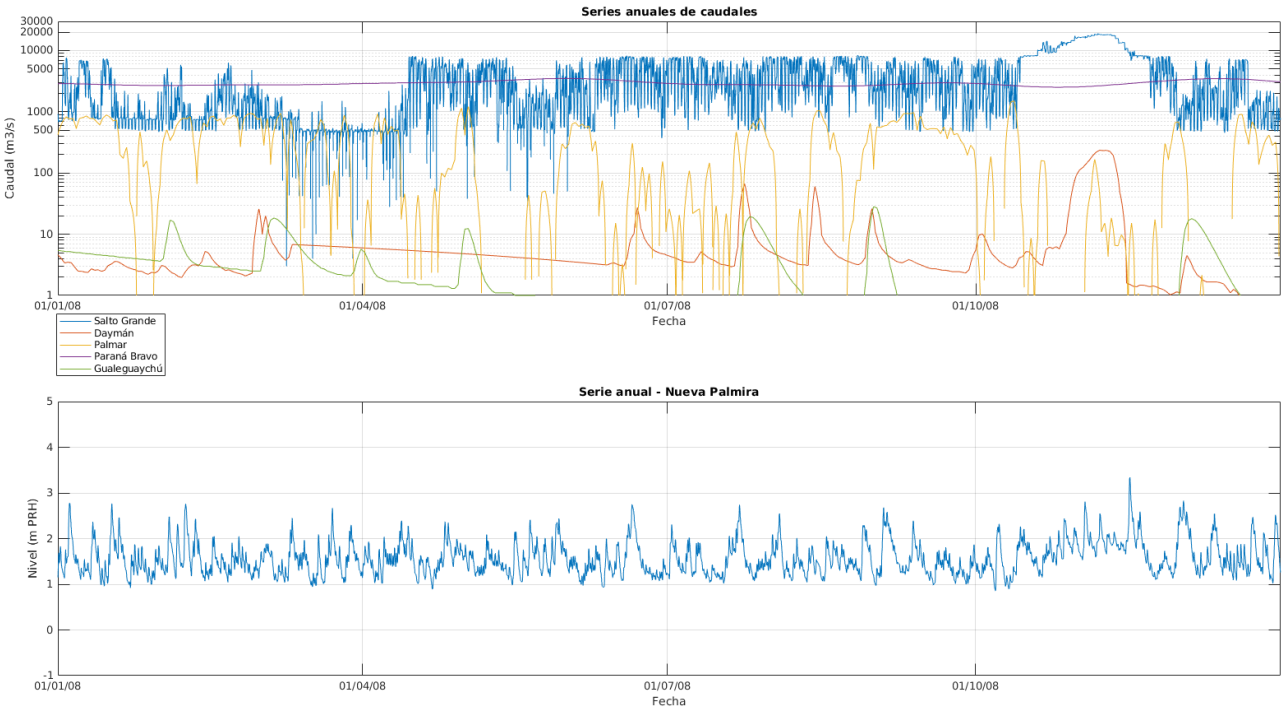


Figura 5.2: Arriba: series de caudales del año 2008 (eje vertical con escala logarítmica). Abajo: serie de niveles de Nueva Palmira.

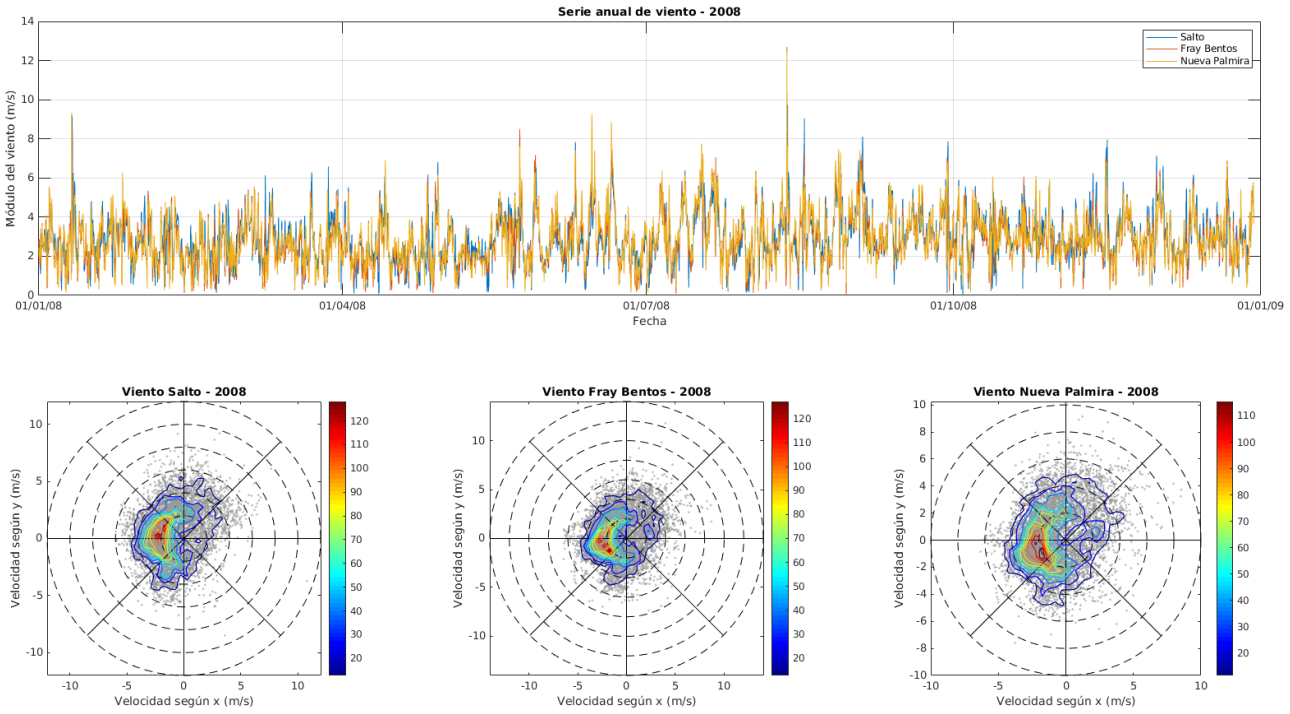


Figura 5.3: Arriba: series de módulo de velocidad de viento del año 2008. Abajo: gráfico de dispersión de velocidades de viento según x e y (positivas hacia el Este y el Norte, respectivamente). Las isolíneas corresponden al número de ocurrencias en celdas de 1 m/s de lado por 1 m/s de alto.

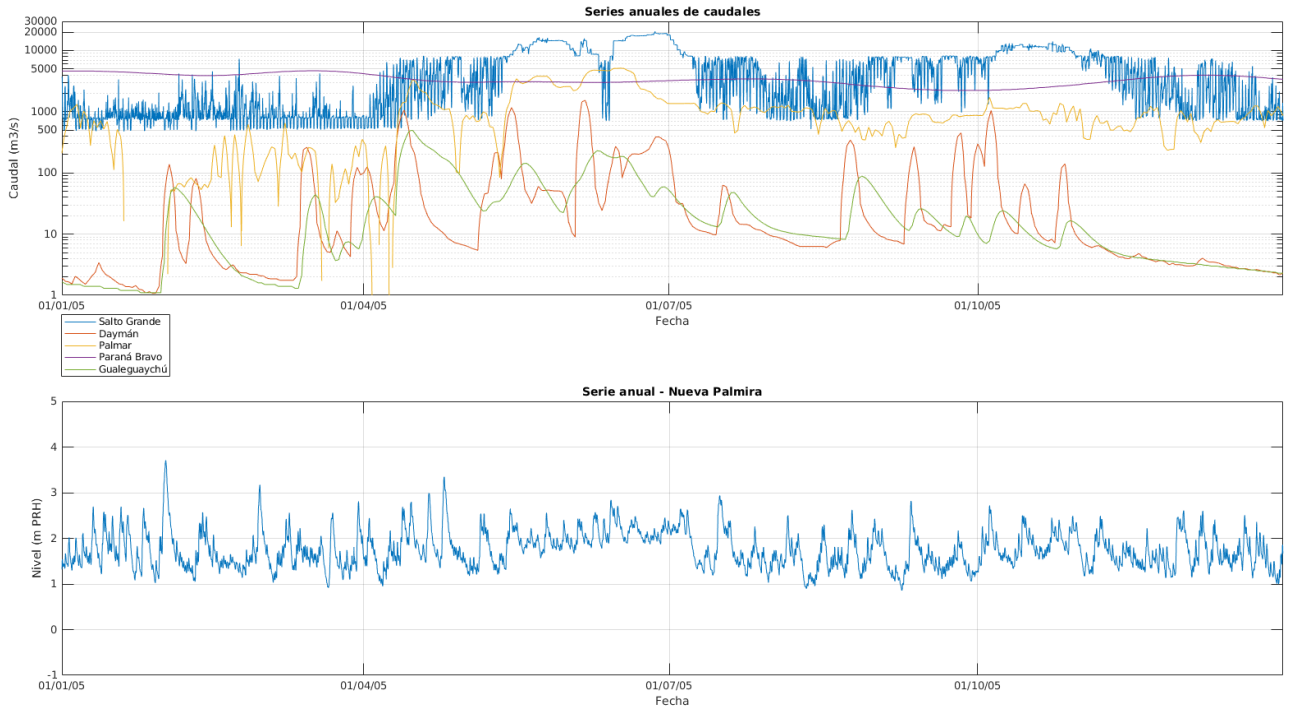


Figura 5.4: Arriba: series de caudales del año 2005 (eje vertical con escala logarítmica). Abajo: serie de niveles de Nueva Palmira.

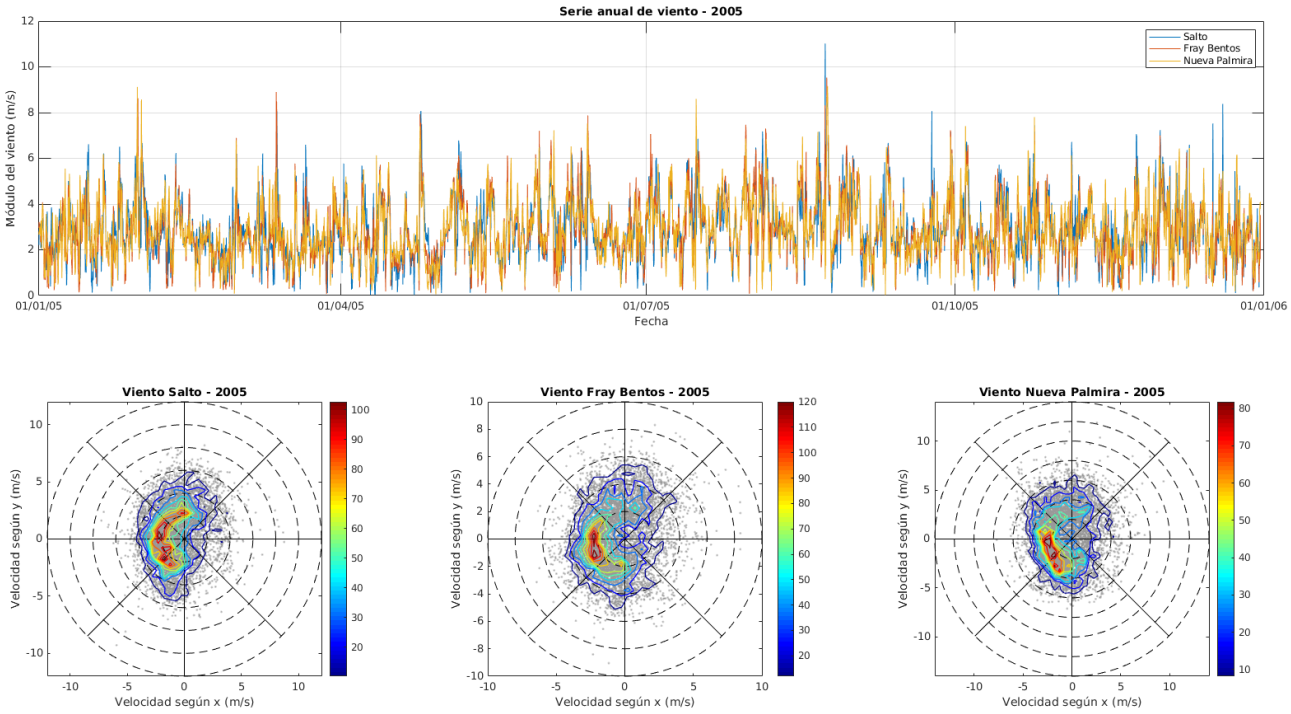


Figura 5.5: Arriba: series de módulo de velocidad de viento del año 2005. Abajo: gráfico de dispersión de velocidades de viento según x e y (positivas hacia el Este y el Norte, respectivamente). Las isolíneas corresponden al número de ocurrencias en celdas de 1 m/s de lado por 1 m/s de alto.

5.2. Calibración de niveles

En esta sección se presenta la calibración del modelo en términos de niveles de superficie libre de acuerdo a la metodología desarrollada en la sección 5.1.

Para la calibración del coeficiente de fricción del cauce se consideran los tres tramos mencionados anteriormente, buscando combinaciones de valores del mismo que lleven a una mejor representación de las series de niveles, de acuerdo a los criterios de selección. En el apéndice 4 se presentan los resultados completos de la calibración. Las combinaciones consideradas se detallan en la tabla 5.1. Las que mejor ajustan a las series medidas corresponden a las configuraciones "G", "H" e "I". En las figuras 5.6 y 5.7 se presentan los diagramas de Taylor para las estaciones de Paysandú y Fray Bentos, respectivamente, donde se puede apreciar que las configuraciones mencionadas anteriormente son las que se encuentran más cerca de la serie de comparación. Por otro lado, en la figura 5.8 se muestran el ERMS, COR y sesgo para cada estación por simulación. Asimismo, en la figura 5.9, se presenta el índice de ajuste por estación y por simulación, así como el índice promedio global de todas las estaciones por simulación, en donde se puede apreciar que las que presentan el mejor índice promedio son las configuraciones "G", "H" e "I".

Cabe destacar que el coeficiente de fricción del Tramo 2 toma un valor bajo en términos físicos y de acuerdo a los valores de bibliografía usuales para estos cuerpos de agua (Te Chow, 1982), pero es necesario para obtener un mejor resultado. Se entiende que esto es causado por la baja densidad de datos de batimetría del cauce en este tramo, que a su vez es particularmente complejo por corresponder a la zona de islas del río, donde hay varios puntos de concentración de flujo que pueden presentar pérdidas de carga elevadas en caso de que la sección transversal del modelo tenga menor área que la real. Este primer resultado indica la importancia de contar con un levantamiento batimétrico integral del río Uruguay, incluyendo las zonas que no necesariamente son de interés para la navegación, dado que la geometría del cauce en éstas repercute en la hidrodinámica del cauce principal.

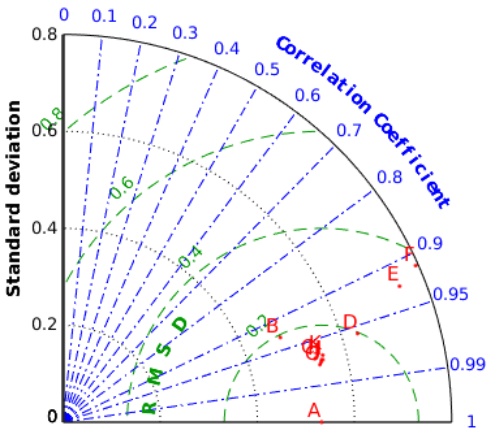


Figura 5.6: Diagrama de Taylor - Paysandú - calibración de coeficiente de Manning para el cauce.

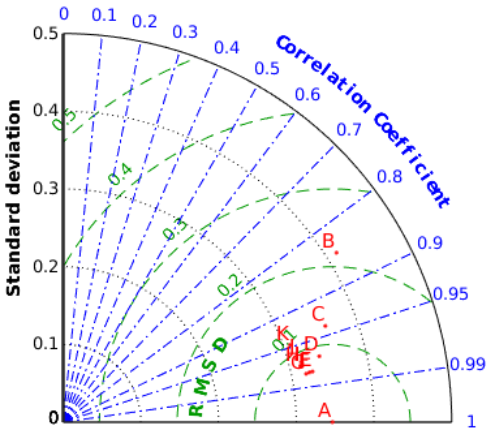


Figura 5.7: Diagrama de Taylor - Fray Bentos - calibración de coeficiente de Manning para el cauce.

Tabla 5.1: Combinaciones de coeficientes de fricción para el cauce evaluados en la primer etapa de calibración. Se resaltan en gris las combinaciones con el mejor ajuste.

Coef. de Manning			Simulación
Tr. 1	Tr. 2	Tr. 3	
0,005	0,005	0,005	B
0,010	0,010	0,010	C
0,015	0,015	0,015	D
0,020	0,020	0,020	E
0,022	0,022	0,022	F
0,022	0,010	0,022	G
0,022	0,010	0,025	H
0,025	0,010	0,025	I
0,027	0,010	0,027	J
0,030	0,010	0,030	K

El coeficiente de fricción de las islas y planicie de inundación se considera constante en toda la extensión del río. Se ejecutan simulaciones con las configuraciones “G”, “H” e “I” de la calibración del cauce, dejando esta fija y variando el coeficiente de fricción de planicies e islas. La configuración que entrega el mejor resultado es la indicada como “M” en la tabla 5.2. A modo de ejemplo se presentan los diagramas de Taylor de esta calibración para las estaciones de Paysandú y Fray Bentos, en las figuras 5.10 y 5.11, respectivamente, donde se puede apreciar que la configuración elegida está entre las más cercanas a la serie medida. Asimismo, la cercanía entre los puntos que representan las distintas configuraciones, mayor que en la calibración del coeficiente de Manning para el cauce, indica en cierta medida la menor sensibilidad que tienen los resultados del modelo respecto a ese coeficiente en la planicie de inundación e islas. En la figura 5.12 se muestra el ERMS, CORCOEF y sesgo para cada estación por simulación. Por su parte, en la figura 5.13, se presenta el índice de ajuste por estación y por simulación, así como

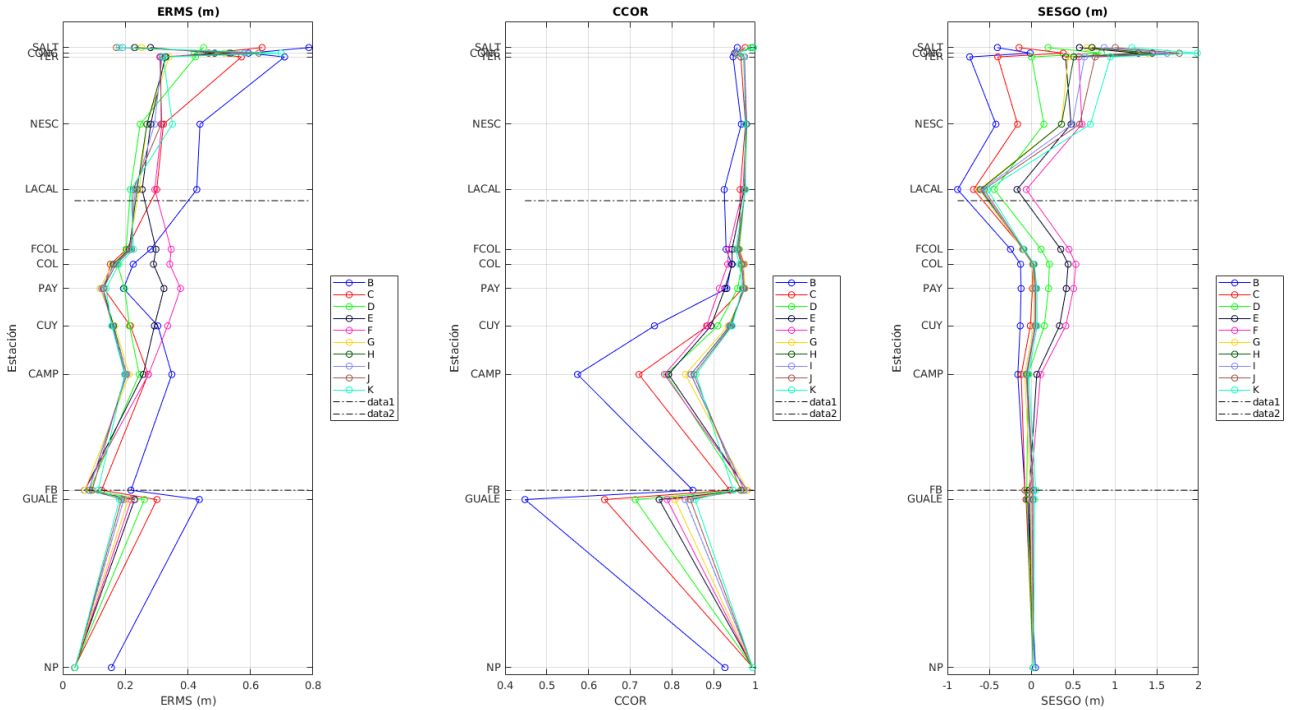


Figura 5.8: ERMS, CORCOEF, y sesgo por estación para cada simulación de calibración del coeficiente de Manning para el cauce.

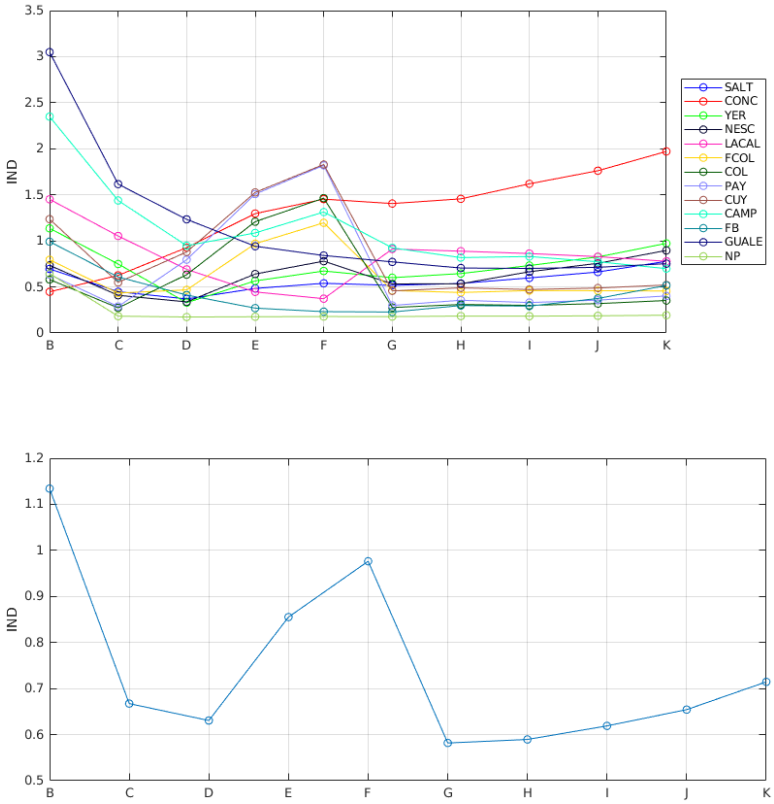


Figura 5.9: Índice de ajuste por estación y simulación (arriba) y promedio global por simulación (abajo) para calibración de coeficiente de Manning en cauce.

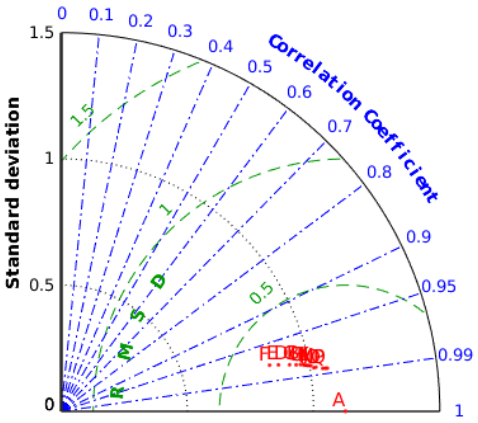


Figura 5.10: Diagrama de Taylor - Paysandú - calibración de coeficiente de Manning para planicie de inundación e islas.

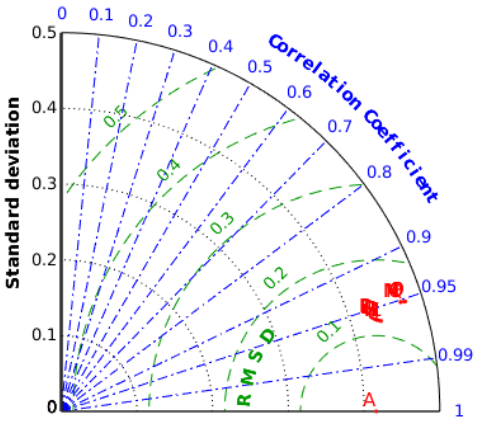


Figura 5.11: Diagrama de Taylor - Fray Bentos - calibración de coeficiente de Manning para planicie de inundación e islas.

el índice promedio global de todas las estaciones por simulación, en donde se puede apreciar que la que presenta el mejor índice promedio es la configuración "M".

Tabla 5.2: Combinaciones de coeficientes de fricción para la planicie de inundación e islas evaluados en la segunda etapa de calibración. Se resalta en gris la combinación con el mejor ajuste.

Coef. de Manning				Simulación	
Tr. 1	Tr. 2	Tr. 3	Islas y p.i.		
0,022	0,010	0,022	0,100	1	B
0,022	0,010	0,022	0,080	2	C
0,022	0,010	0,022	0,060	3	D
0,022	0,010	0,022	0,040	4	E
0,022	0,010	0,022	0,030	5	F
0,022	0,010	0,022	0,120	6	G
0,022	0,010	0,022	0,140	7	H
0,022	0,010	0,022	0,160	8	I
0,022	0,010	0,022	0,180	9	J
0,022	0,010	0,022	0,200	10	K
0,022	0,010	0,022	0,200	11	L
0,022	0,010	0,025	0,250	16	M
0,025	0,010	0,025	0,200	12	N
0,025	0,010	0,025	0,500	13	O
0,025	0,010	0,025	0,750	14	P
0,025	0,010	0,025	1,000	15	Q

Para la calibración del coeficiente de influencia del viento este se considera uniforme en todo el dominio de cálculo. Se ejecutan simulaciones con la configuración "M" de la etapa anterior de calibración, dejando los valores de coeficiente de fricción de fondo fijos y variando el coeficiente de influencia del viento dentro del rango propuesto por Flather (1976), con a_{wind} entre $0,565 \times 10^{-3}$ y $2,513 \times 10^{-3}$. Cabe destacar que el parámetro de calibración utilizado

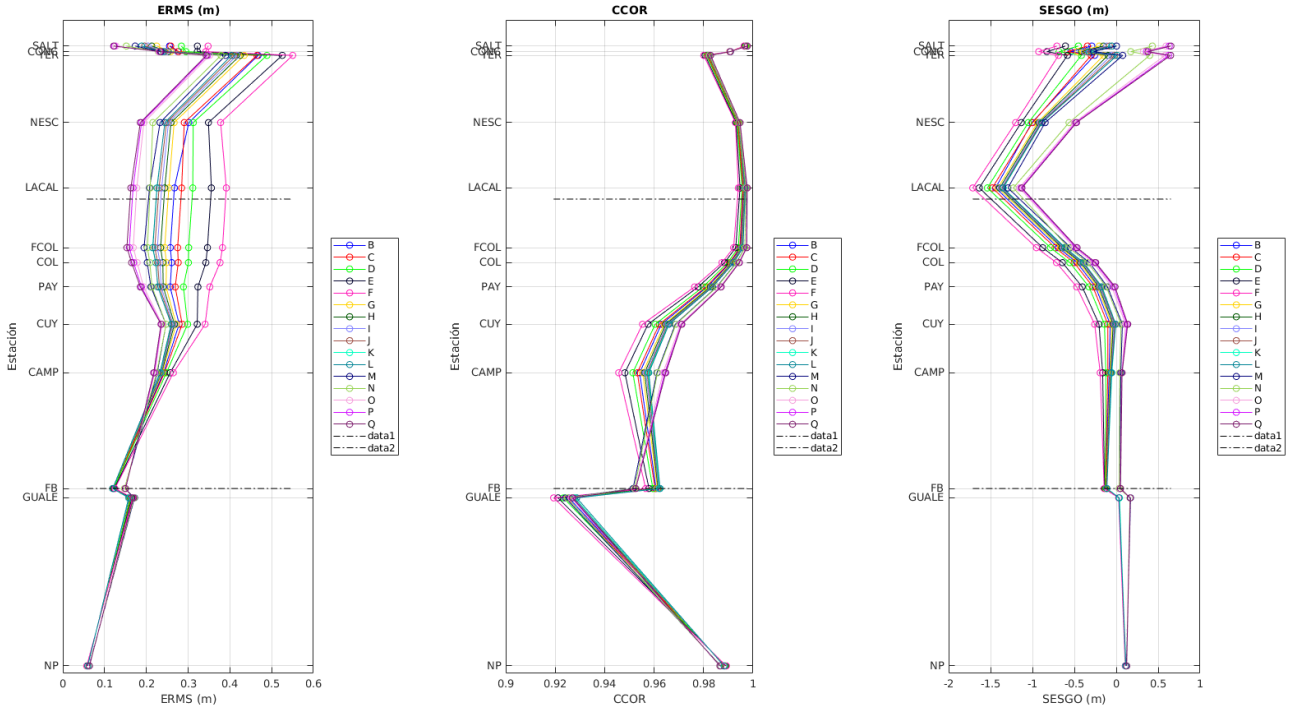


Figura 5.12: ERMS, CORCOEF, y sesgo por estación para cada simulación de calibración del coeficiente de Manning para planicie de inundación e islas.

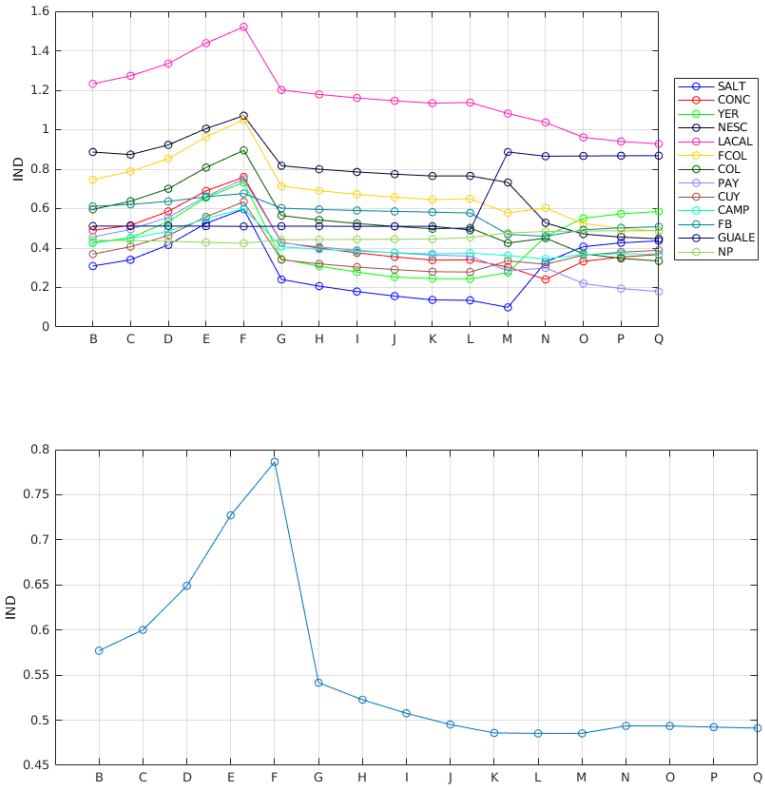


Figura 5.13: Índice de ajuste por estación y simulación (arriba) y promedio global por simulación (abajo) para calibración de coeficiente de Manning en planicie de inundación e islas.

por el modelo corresponde a $COWI = \frac{\rho_{air}}{\rho_{water}} \times a_{wind}$. Se considera $\rho_{air} = 1,2 kg/m^3$ y $\rho_{water} = 1000 kg/m^3$, las densidades del aire y el agua respectivamente. En la tabla 5.3 se muestran los valores utilizados para la calibración, teniendo que la configuración "E" arroja los mejores resultados. En las figuras 5.14 y 5.15 se muestran los diagramas de Taylor para las estaciones de Paysandú y Fray Bentos, respectivamente, donde se ve que los puntos correspondientes a las distintas configuraciones probadas son muy cercanos, indicando de cierta manera la baja sensibilidad de los resultados del modelo al parámetro, y que la incorporación del mismo no necesariamente mejora en gran medida el comportamiento global del ajuste (aunque la tensión del viento puede llegar a ser de relevancia en eventos particulares). En la figura 5.16 se presenta el ERMS, CORCOEF y sesgo por estación para cada simulación, observando que la diferencia cuantitativa entre las distintas configuraciones es mínima, al igual que sucede con el índice de ajuste tanto individual por estación como promedio global presentado en la figura 5.17, viendo de todos modos que las configuraciones "D" y "E" tienen el mejor ajuste, seleccionando finalmente la configuración "E".

Tabla 5.3: Combinaciones de coeficientes de influencia del viento evaluados en la tercer etapa de calibración.

Coef. de Manning				COWI	Simulación	
Tr. 1	Tr. 2	Tr. 3	Islas y p.i.			
0,022	0,010	0,025	0,250	6,78E-07	1	B
0,022	0,010	0,025	0,250	9,38E-07	2	C
0,022	0,010	0,025	0,250	1,20E-06	3	D
0,022	0,010	0,025	0,250	1,46E-06	4	E
0,022	0,010	0,025	0,250	1,72E-06	5	F
0,022	0,010	0,025	0,250	1,98E-06	6	G
0,022	0,010	0,025	0,250	2,24E-06	7	H
0,022	0,010	0,025	0,250	2,50E-06	8	I
0,022	0,010	0,025	0,250	2,76E-06	9	J
0,022	0,010	0,025	0,250	3,02E-06	10	K
0,022	0,010	0,025	0,250	0,00E+00	11	L

De la etapa de calibración del modelo se concluye que la configuración que mejor se acerca a la representación de las series de datos de nivel consideradas, corresponde a la siguiente:

- Coeficiente de fricción de Manning en el cauce:
  - Tramo 1: 0,022.
  - Tramo 2: 0,010.
  - Tramo 3: 0,025.
- Coeficiente de fricción de Manning en planicie de inundación e islas: 0,25.
- Coeficiente de influencia del viento: 1,46E-6

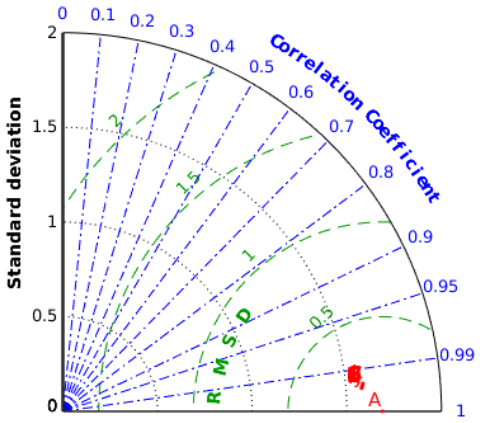


Figura 5.14: Diagrama de Taylor - Paysandú - calibración de coeficiente de influencia del viento.

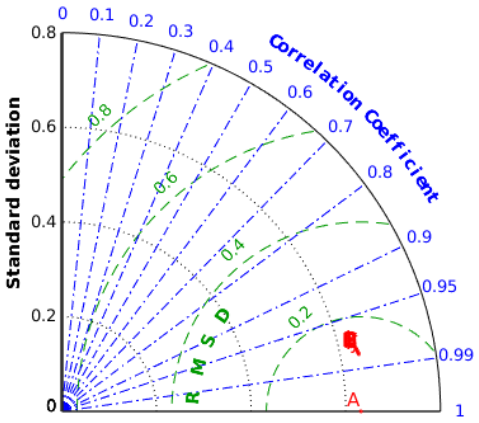


Figura 5.15: Diagrama de Taylor - Fray Bentos - calibración de coeficiente de influencia del viento.

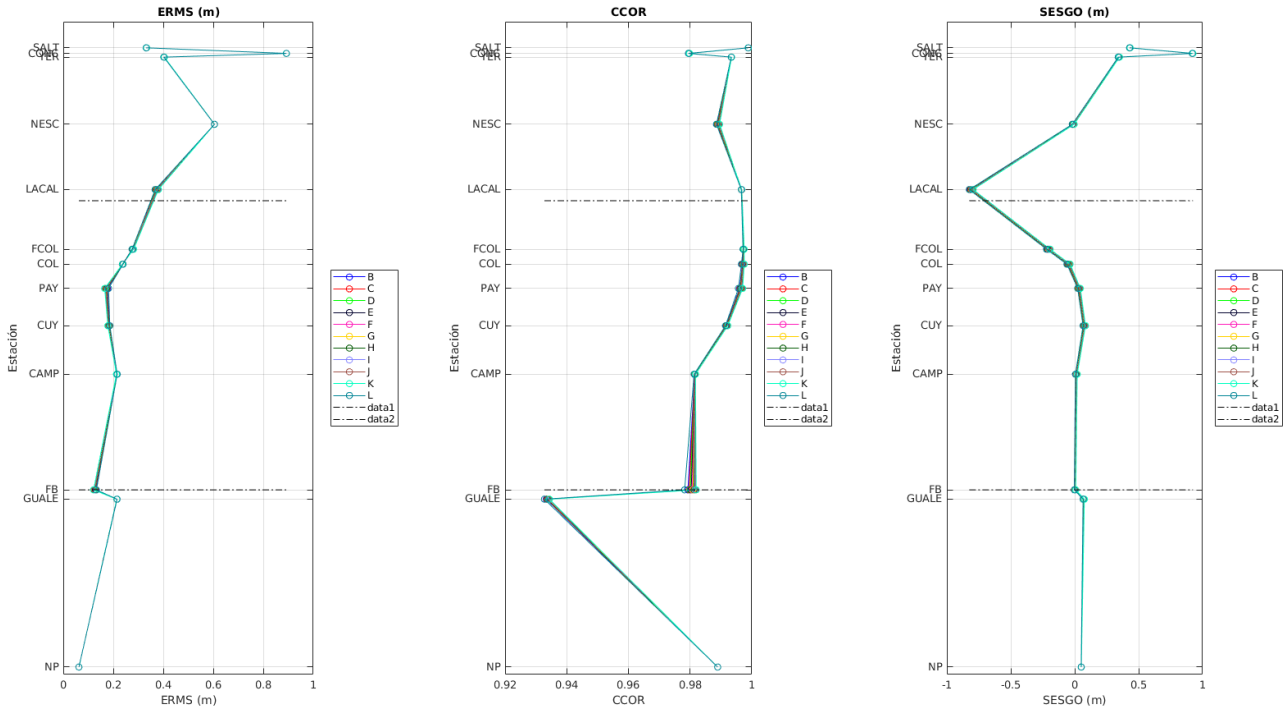


Figura 5.16: ERMS, CORCOEF, y sesgo por estación para cada simulación de calibración del coeficiente de influencia del viento.

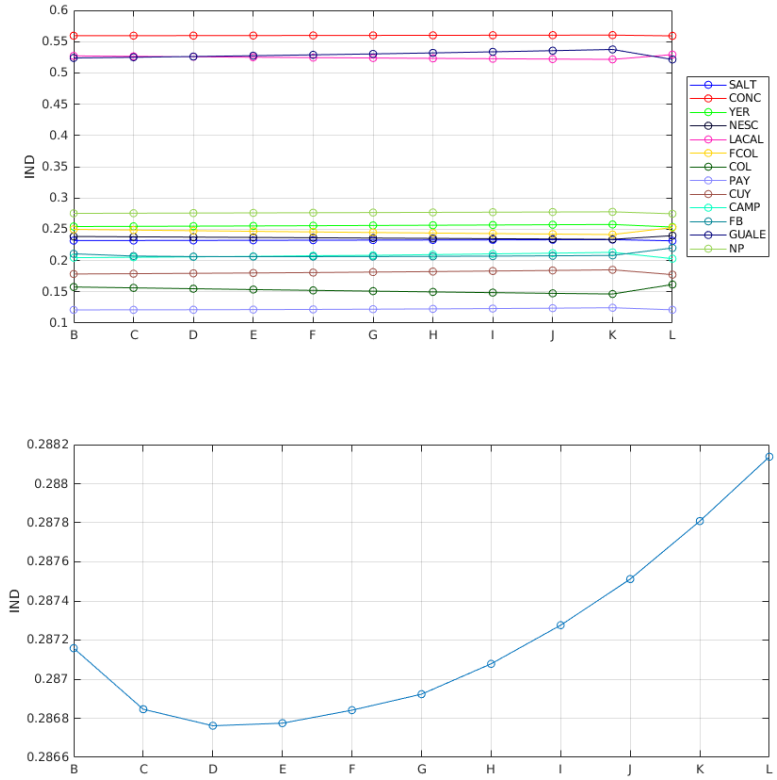


Figura 5.17: Índice de ajuste por estación y simulación (arriba) y promedio global por simulación (abajo) para calibración del coeficiente de influencia del viento.

En las figuras a continuación se presentan los resultados de la configuración seleccionada, mostrando comparaciones de las series de niveles simuladas y medidas, de la figura 5.18 a la 5.30. Se presentan asimismo los diagramas de Taylor correspondientes, de la figura 5.31 a la 5.43, donde la serie medida se indica como "A" y la simulada como "B".

Recorriendo desde aguas arriba a aguas abajo las series de comparación de niveles medidos y simulados, se puede observar que para Salto y Concordia, figuras 5.18 y 5.19 respectivamente, estaciones cercanas entre sí sobre márgenes opuestas, el modelo sobrestima fuertemente los niveles inferiores a 4 m PRH, sobrestimando en menor medida los inferiores a 9 m PRH. Los niveles entre 9 y 12 m PRH fueron representados de mejor manera, subestimando los superiores a 12 m PRH. En las estaciones de Yeruá y Nueva Escocia, figuras 5.20 y 5.21, se observa un comportamiento similar. Los diagramas de Taylor para estas estaciones, mostrados en las figuras 5.31 a 5.34, indican un buen ajuste de las series temporales simuladas a las medidas, con correlaciones superiores a 0,99 para los casos de Salto y Yeruá, observando en todos los casos que las series simuladas presentaron menor desviación estándar que las medidas.

Ya en la estación de La Calera, figura 5.22, los datos simulados subestiman la totalidad de los medidos, lo cual visto a la luz de los demás resultados, podría indicar un error en la referencia vertical utilizada para los datos medidos al momento de su procesamiento. El diagrama de Taylor (figura 5.35) indica sin embargo un buen ajuste, con valores de correlación superiores a

0,99 y una desviación estándar inferior para los datos simulados respecto a los medidos.

Por su parte las estaciones de Fábrica Colón, Colón y Paysandú, mostradas de la figura 5.23 a 5.25, presentan comportamientos similares entre sí. En todas se observa un buen ajuste de los valores de nivel inferiores a los 5 m PRH, mostrando una subestimación de los valores superiores, la cual se atenúa desde aguas arriba hacia aguas abajo. Los diagramas de Taylor de estas estaciones, mostrados de la figura 5.36 a 5.38, indican un buen ajuste entre las series temporales medidas y simuladas, con coeficientes de correlación superiores a 0,99 en todos los casos, y desviaciones estándar de las series simuladas menores a las de medidas.

Las estaciones de Concepción del Uruguay y Campichuelo, cuyas series temporales de nivel se muestran en las figuras 5.26 y 5.27, presentan un buen ajuste de los niveles inferiores a 3 m PRH, sobrestimando los niveles altos. Sus diagramas de Taylor respectivos, presentados en las figuras 5.32 y 5.40, indican un buen ajuste de las series, con valores de correlación superiores a 0,95, desviaciones estándar muy similares entre las series medidas y simuladas, y ERMS del orden de 0,2 m.

Las estaciones de Gualeguaychú y Fray Bentos, cuyas series temporales de nivel se presentan en las figuras 5.28 y 5.29, muestran un buen ajuste, sobrestimando la simulación los niveles altos sostenidos en el tiempo. Gualeguaychú es la estación con menor correlación entre la serie medida y la simulada, con un valor de 0,9, según se puede ver en el diagrama de Taylor de la figura 5.41, presentando un ERMS del orden de 0,2 m y una desviación estándar levemente menor a la medida. Fray bentos presenta un mejor ajuste, según se puede ver en la figura 5.42, con un coeficiente de correlación cercano a 0,99 y un ERMS del orden de 0,1 m.

La estación de Nueva Palmira se encuentra muy cerca de la condición de borde en niveles, impuesta como la serie temporal medida en esa misma estación. En función de lo anterior, se observa un muy buen ajuste de la serie simulada con la medida, según se puede ver en la figura 5.30, lo cual también se refleja en el diagrama de Taylor de la figura 5.43, que muestra un coeficiente de correlación superior a 0,99, con una desviación estándar muy similar entre medición y simulación, y un ERMS del orden de 0,05 m.

En la figura 5.44 se presenta un resumen de los estadísticos de ajuste, viendo que en términos generales el ERMS disminuye desde aguas arriba a aguas abajo, con valores de entre 0,4 m a 0,05 m, excepto en la estación de Concordia, donde toma un valor de 0,7 m aproximadamente. El coeficiente de correlación toma valores cercanos a 1 para la mayoría de las estaciones, presentando el menor valor en Gualeguaychú, donde es de 0,9 aproximadamente. El sesgo, calculado como la diferencia entre las medias de las series medida y simulada para cada estación, se mantiene muy cerca de cero para las estaciones aguas abajo de Fábrica Colón, siendo negativo para Fábrica Colón y La Calera, y positivo para las estaciones aguas arriba de esta última. En la tabla 5.4 se presentan los estadísticos anteriores así como la comparación de las medias y la desviación estándar de las series medidas y simuladas para cada estación.

Los primeros 2 meses del año simulado corresponden a caudales medios y bajos en Salto Grande, inferiores a los 8.000 m^3/s en todos los casos y por momentos inferiores a los 1.000 m^3/s. El tercer mes y medio de la serie corresponde a caudales bajos en Salto Grande, observándose posteriormente caudales en el rango medio, registrándose luego un evento de crecida con su comienzo a mediados de octubre, llegando a un pico de 20.000 m^3/s hacia principios de noviembre, para luego situarse nuevamente en el rango de caudales medios hacia finales de ese mes y por el resto del año (ver apéndice 1).

Estación	ERMS	CCor	Sesgo	Media (m PRH)		STD (m)	
	(m)	-	(m)	Medida	Simulada	Medida	Simulada
Salto	0,31	0,998	0,64	5,41	6,05	2,66	2,41
Concordia	0,72	0,960	1,26	5,03	5,81	2,53	2,28
Yeruá	0,37	0,990	0,46	4,37	5,00	2,28	2,09
Nueva Escocia	0,45	0,981	0,24	4,06	4,11	2,04	1,78
La Calera	0,31	0,993	-0,66	3,82	3,13	1,71	1,47
F. Colón	0,24	0,992	-0,12	2,84	2,72	1,42	1,25
Colón	0,19	0,994	0,01	2,65	2,67	1,34	1,21
Paysandú	0,13	0,994	0,05	2,52	2,57	1,19	1,15
C. del Uruguay	0,17	0,987	0,06	2,34	2,38	1,01	1,01
Campichuelo	0,21	0,965	-0,03	2,15	2,09	0,78	0,79
Fray Bentos	0,09	0,983	0,01	1,79	1,81	0,50	0,49
Gualeguaychú	0,20	0,905	0,03	1,78	1,80	0,47	0,47
Nueva Palmira	0,05	0,991	0,03	1,61	1,61	0,37	0,37

Tabla 5.4: Resumen de indicadores de calidad de ajuste y parámetros estadísticos de comparación entre series medidas y simuladas para 2008.

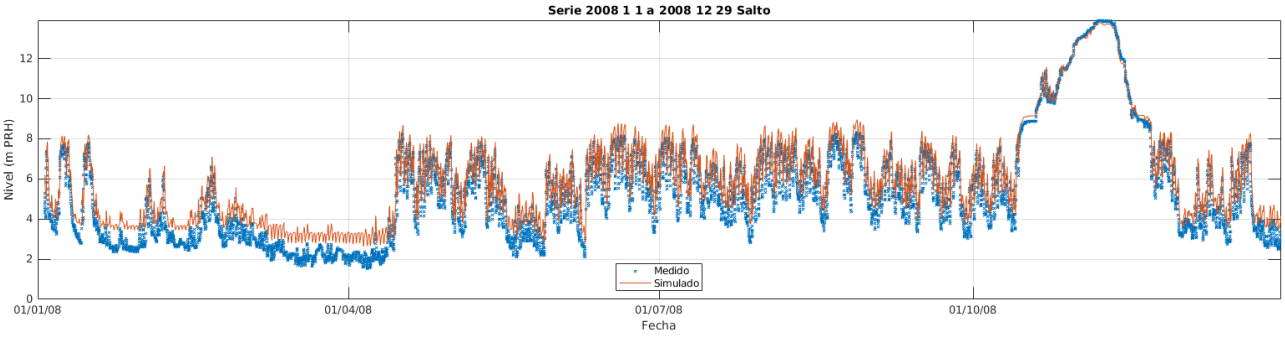


Figura 5.18: Series de niveles medidas y simuladas - Salto - 2008.

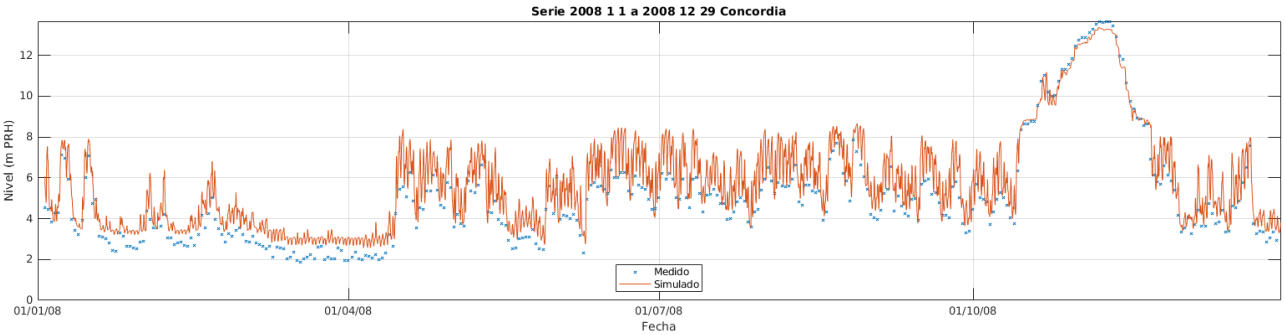


Figura 5.19: Series de niveles medidas y simuladas - Concordia - 2008.

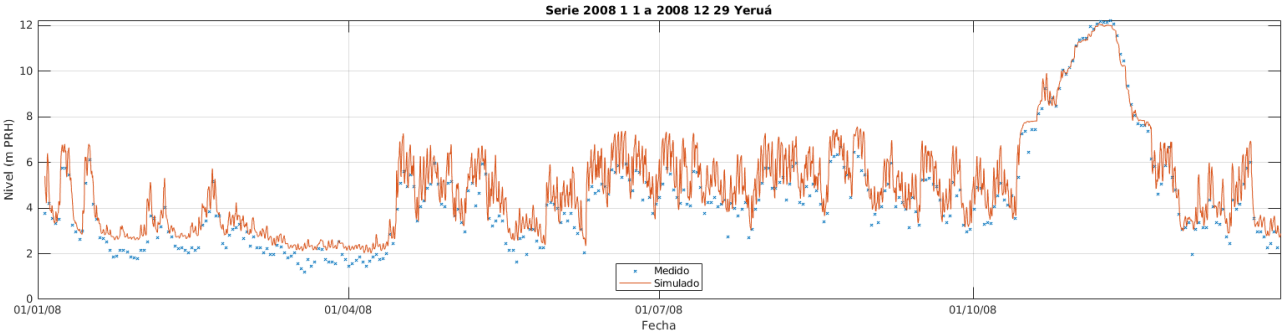


Figura 5.20: Series de niveles medidas y simuladas - Yerúa - 2008.

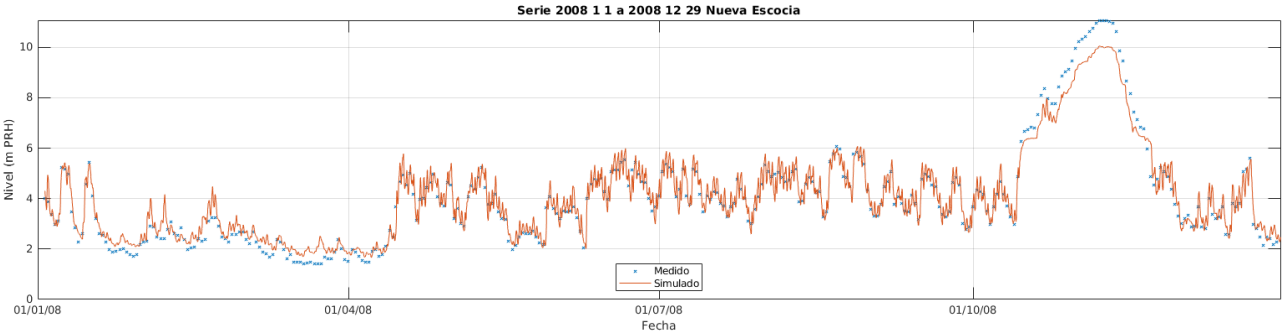


Figura 5.21: Series de niveles medidas y simuladas - Nueva Escocia - 2008.

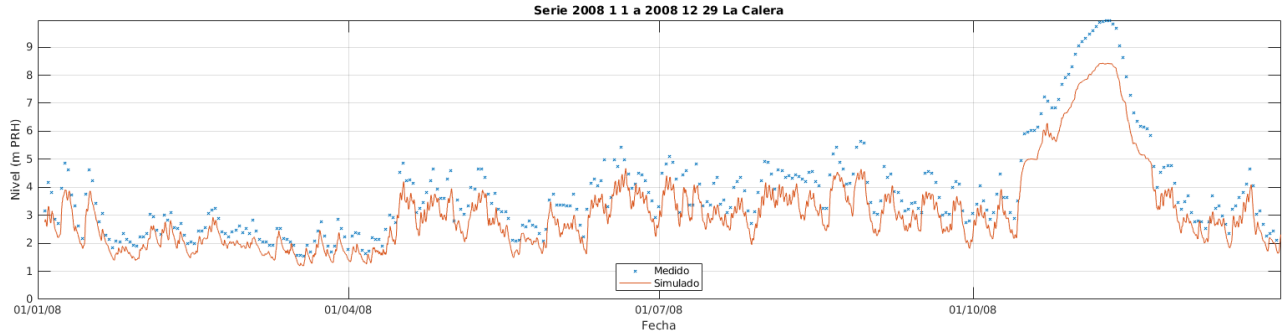


Figura 5.22: Series de niveles medidas y simuladas - La Calera - 2008.

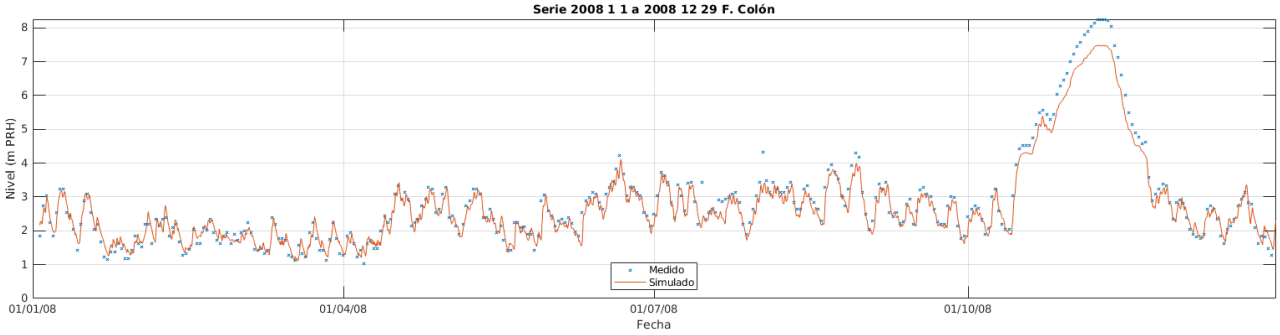


Figura 5.23: Series de niveles medidas y simuladas - Fábrica Colón - 2008.

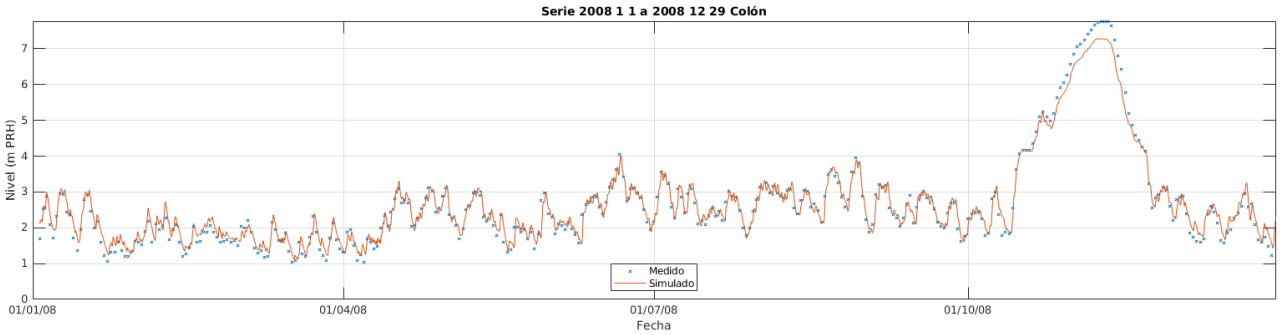


Figura 5.24: Series de niveles medidas y simuladas - Colón - 2008.

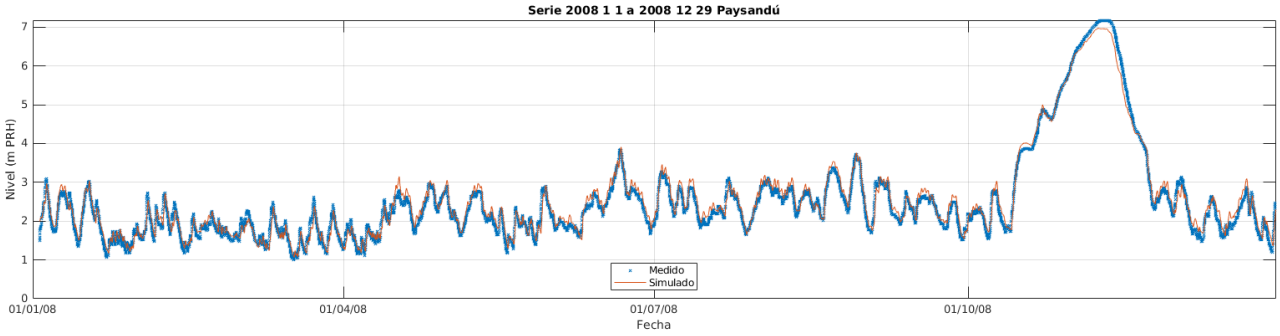


Figura 5.25: Series de niveles medidas y simuladas - Paysandú - 2008.

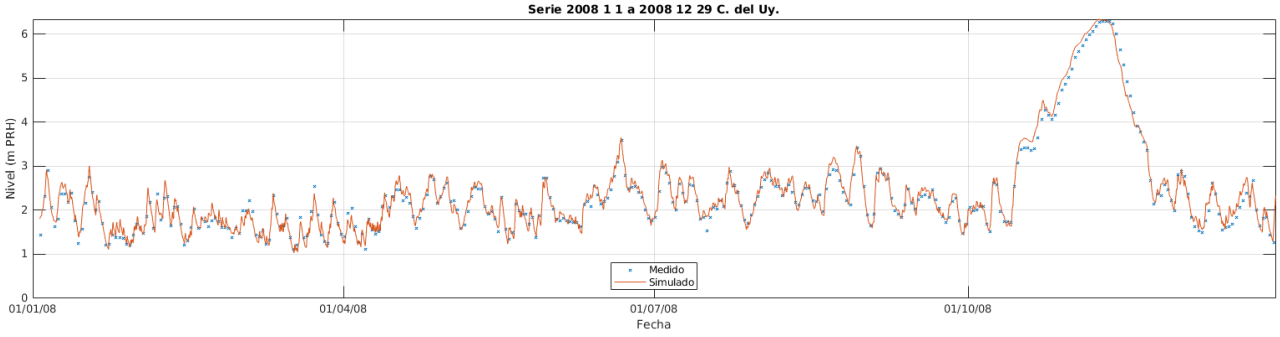


Figura 5.26: Series de niveles medidas y simuladas - Concepción del Uruguay - 2008.

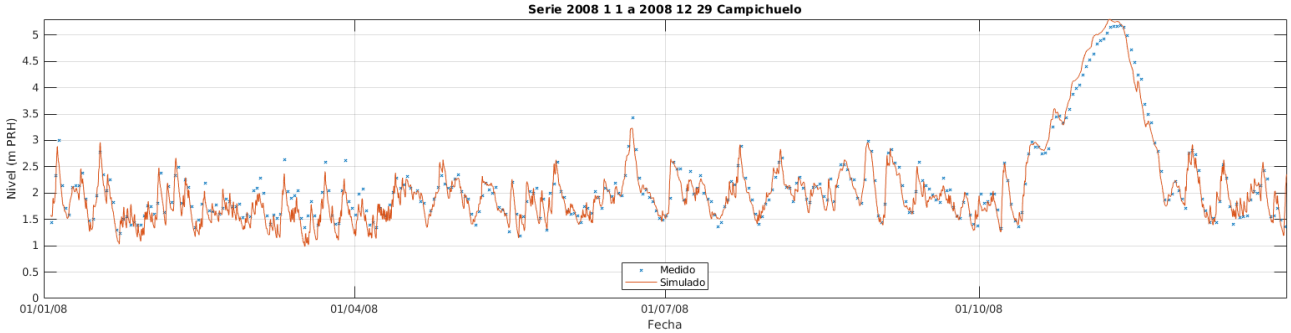


Figura 5.27: Series de niveles medidas y simuladas - Campichuelo - 2008.

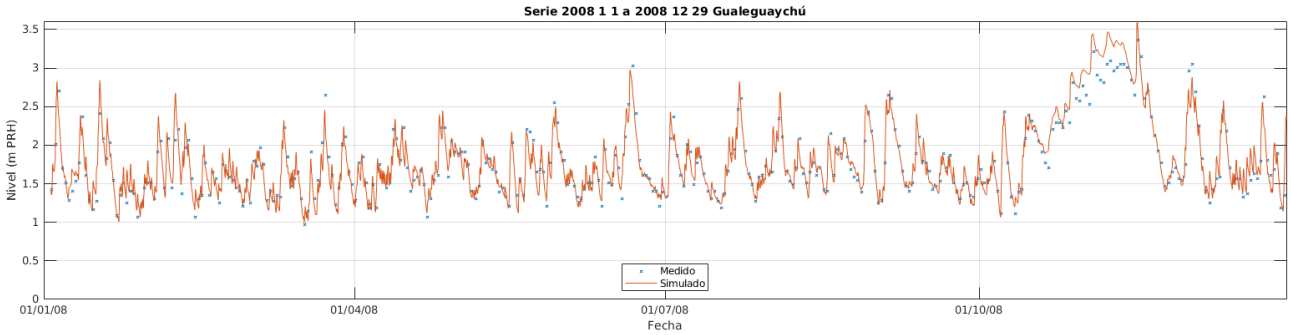


Figura 5.28: Series de niveles medidas y simuladas - Gualeguaychú - 2008.

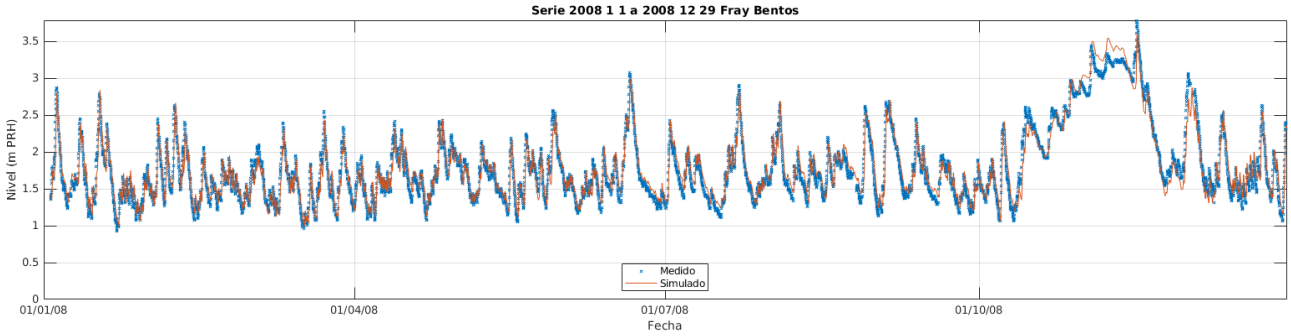


Figura 5.29: Series de niveles medidas y simuladas - Fray Bentos - 2008.

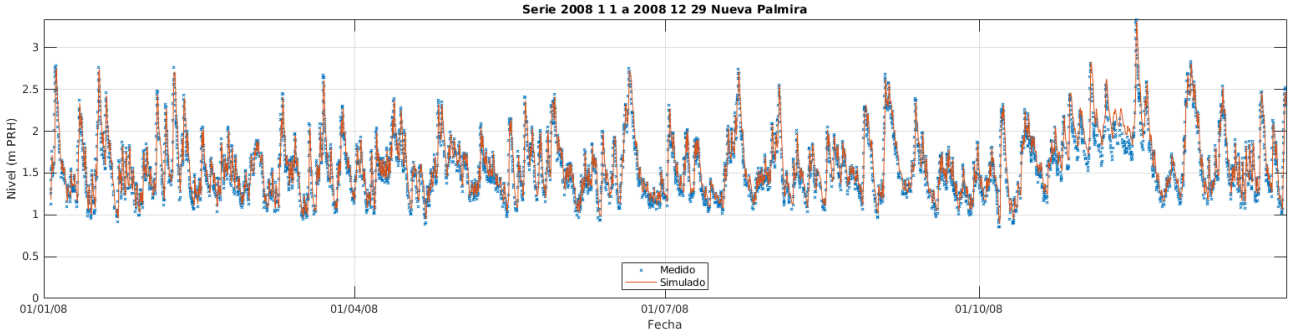


Figura 5.30: Series de niveles medidas y simuladas - Nueva Palmira - 2008.

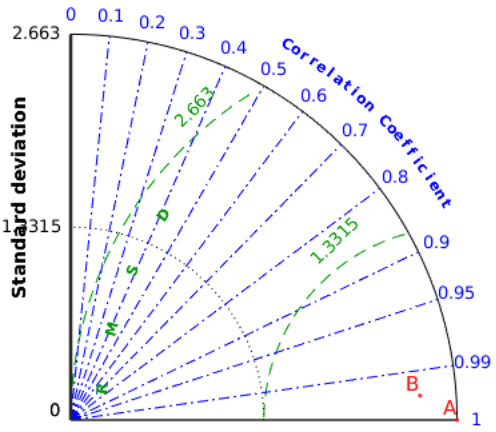


Figura 5.31: Diagrama de Taylor - Salto - 2008

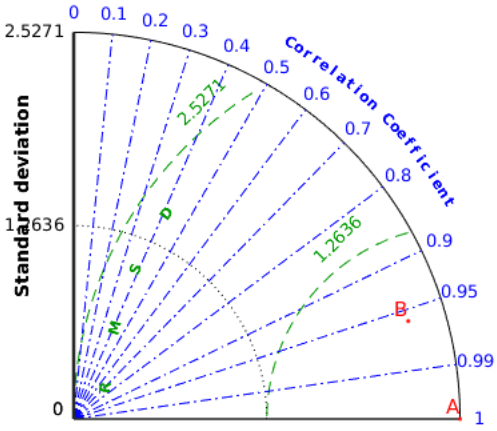


Figura 5.32: Diagrama de Taylor - Concordia - 2008

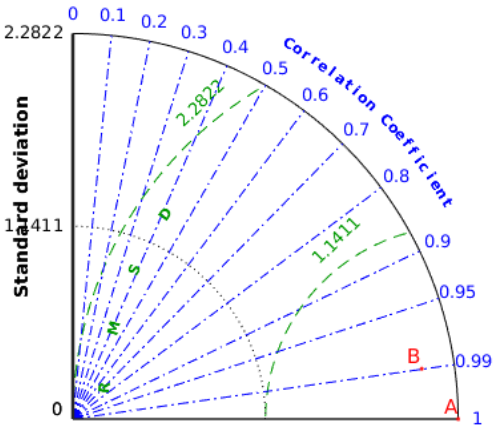


Figura 5.33: Diagrama de Taylor - Yerúa - 2008.

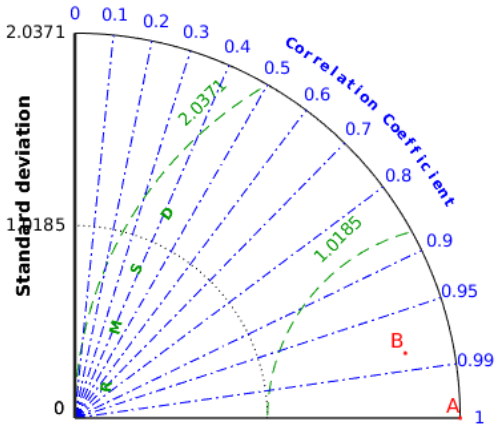


Figura 5.34: Diagrama de Taylor - Nueva Escocia - 2008.

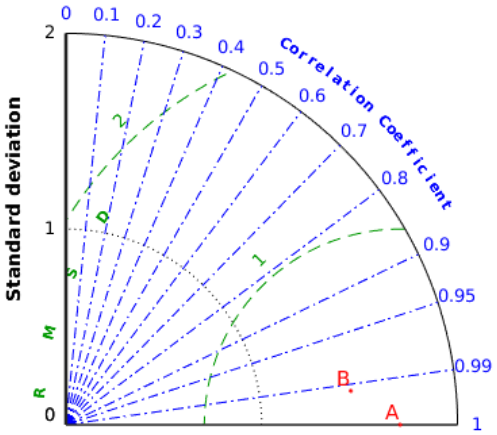


Figura 5.35: Diagrama de Taylor - La Calera - 2008.

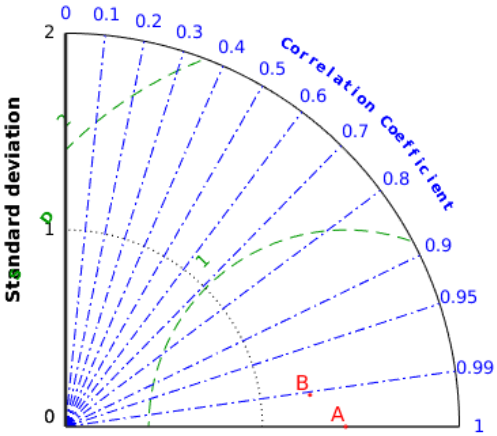


Figura 5.36: Diagrama de Taylor - Fábrica Colón - 2008.

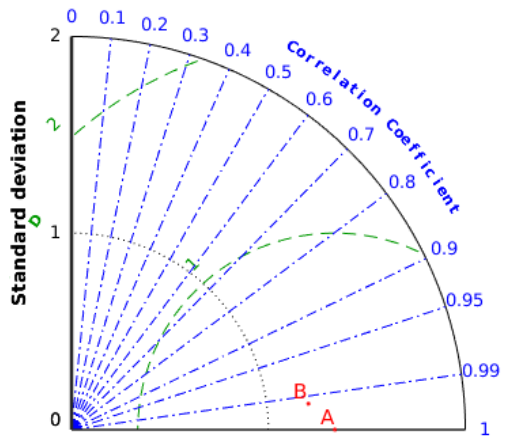


Figura 5.37: Diagrama de Taylor - Colón - 2008.

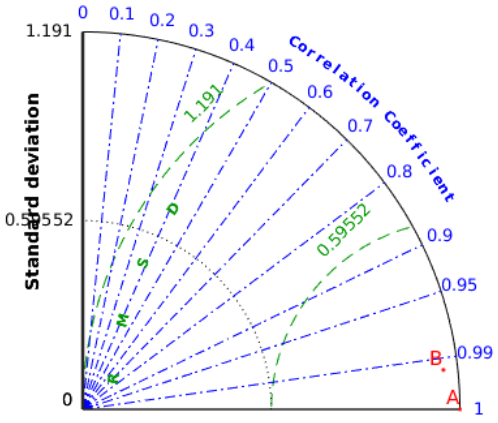


Figura 5.38: Diagrama de Taylor - Paysandú - 2008.

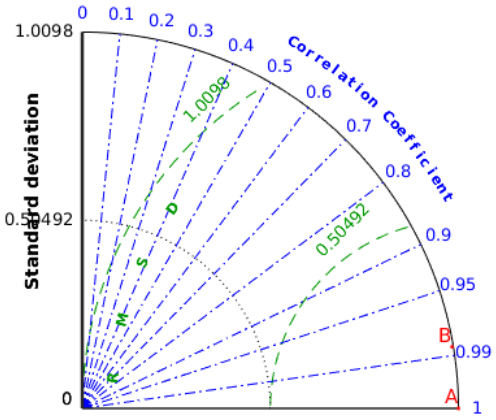


Figura 5.39: Diagrama de Taylor - Concepción del Uruguay - 2008.

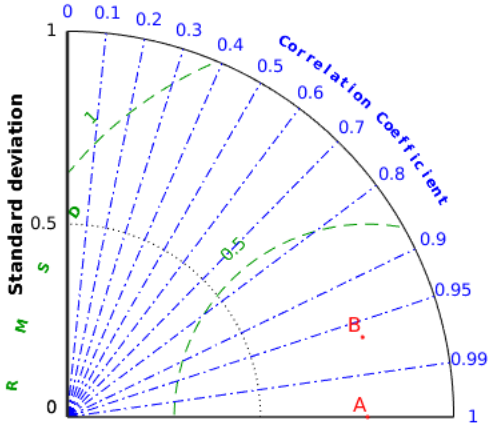


Figura 5.40: Diagrama de Taylor - Campichuelo - 2008.

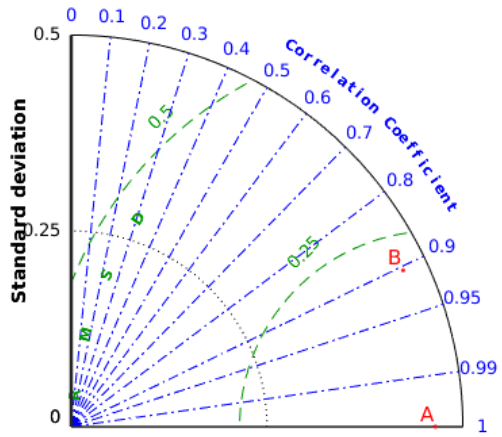


Figura 5.41: Diagrama de Taylor - Gualeguaychú - 2008.

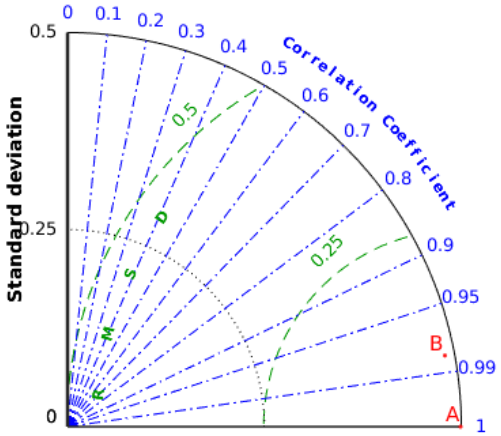


Figura 5.42: Diagrama de Taylor - Fray Bentos - 2008.

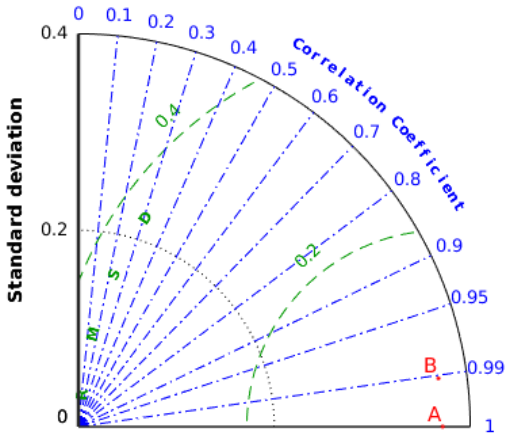


Figura 5.43: Diagrama de Taylor - Nueva Palmira - 2008.

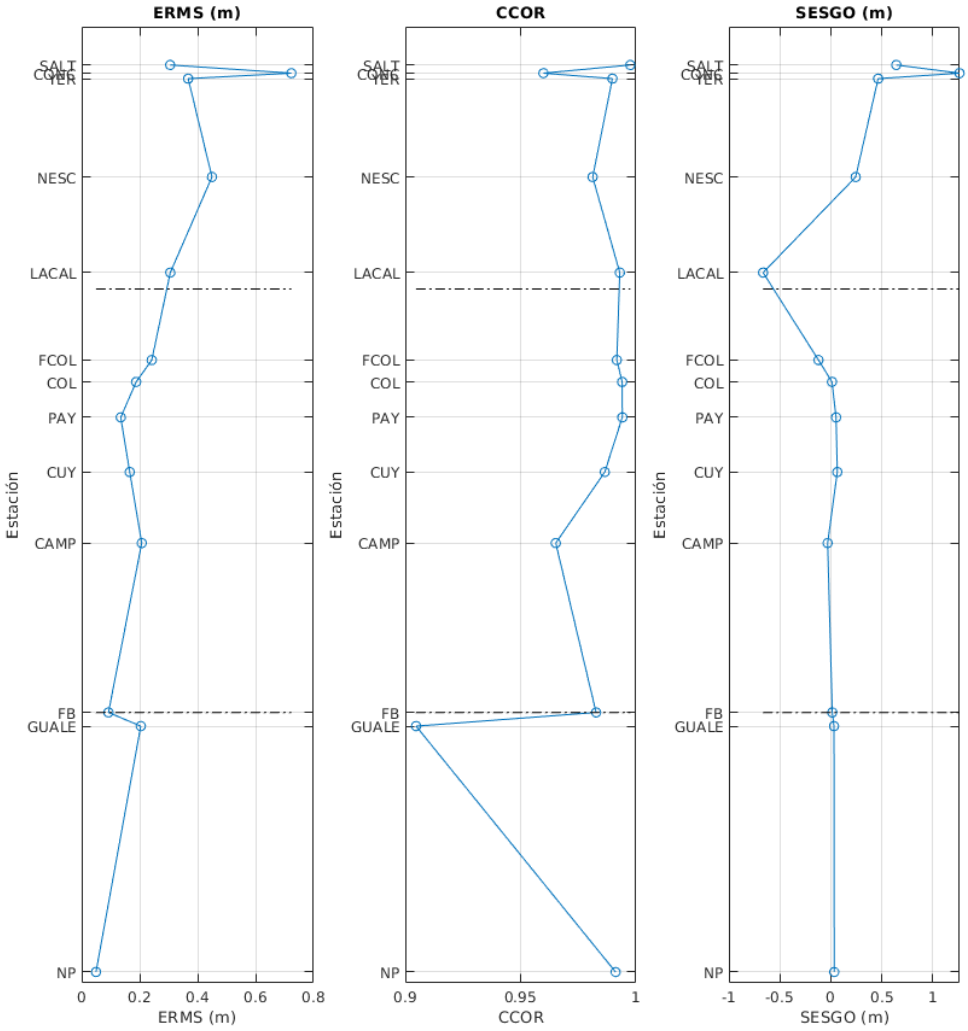


Figura 5.44: Error RMS (izquierda), coeficiente de correlación (medio), sesgo (derecha) - 2008. La ubicación de las estaciones en el eje vertical es proporcional a la progresiva del río en la que se encuentran. Las líneas punteadas horizontales indican las transiciones entre los 3 tramos del río considerados en la calibración.

5.3. Validación de niveles

De acuerdo a lo expuesto en la sección 5.1, se presenta a continuación la validación de niveles en base a la comparación de las series temporales de nivel medido y simulado para el año 2005 en las 13 estaciones a lo largo del río (ver figura 3.1a).

En el caso de Salto el modelo sobrestima los niveles bajos, asociados a caudales de entre 500 y 1.000 m^3/s, mientras que los niveles altos, asociados a caudales del orden de los 20.000 m^3/s son levemente subestimados. Los niveles intermedios, asociados a caudales de entre 5.000 y 10.000 m^3/s son los mejor representados (ver figura 5.45). La serie simulada presenta un coeficiente de correlación superior a 0,99, con un ERMS de 0,38 m, según se puede ver en la figura 5.58, consistentes con los de la etapa de calibración. En Concordia se observa un comportamiento similar al de Salto, según se puede ver en la figura 5.46. La serie simulada presenta un coeficiente de correlación superior a 0,97, con un ERMS de 0,79 m, según se puede ver en la figura 5.59, también consistentes con los presentados en la calibración.

Para la estación de Yeruá se observa un comportamiento similar al de Salto, según se puede ver en la figura 5.47. La serie simulada presenta un coeficiente de correlación superior a 0,99, con un ERMS de 0,36 m, según se puede ver en la figura 5.60. En el caso de Nueva Escocia también se observa un comportamiento del modelo similar al de Salto, como se muestra en la figura 5.48. La serie simulada presenta un coeficiente de correlación superior a 0,98, con un ERMS de 0,59 m, según se puede ver en la figura 5.61. El comportamiento de ambas estaciones es consistente con el de la calibración.

En La Calera el modelo subestima prácticamente la totalidad de los niveles, del mismo modo que sucede en la calibración, según se puede ver en la figura 5.49, presentando mayor diferencia en los niveles altos que en los bajos. La serie simulada presenta un coeficiente de correlación superior a 0,99, con un ERMS de 0,41 m, según se puede ver en la figura 5.62. En Fábrica Colón se obtiene un mejor ajuste de los niveles bajos, subestimando los medios y altos, según se muestra en la figura 5.50, con un coeficiente de correlación de 0,99 y un ERMS de 0,36 m, según se puede ver en la figura 5.63, también consistente con lo obtenido en la calibración.

Colón presenta un mejor ajuste respecto a los niveles bajos, subestimando en cierta medida los medios y altos, como se muestra en la figura 5.51. La serie simulada presenta un coeficiente de correlación superior a 0,99, con un ERMS de 0,32 m, de acuerdo a lo presentado en la figura 5.64.

Paysandú tiene un comportamiento similar a Salto, sobrestimando levemente los niveles bajos, subestimando en cierta medida los altos y ajustando en mayor medida los medios, según se muestra en la figura 5.52. La serie simulada presenta un coeficiente de correlación superior a 0,99, con un ERMS de 0,18 m, según se puede ver en la figura 5.65. Cabe destacar que no se cuenta con registros de nivel completos para el año 2005 en esta estación, lo cual no permite

observar el comportamiento relativo en el período de caudales bajos en los primeros meses del año, ni en los períodos de crecida de mayo y junio.

Concepción del Uruguay presenta un buen ajuste de la gran mayoría de los niveles, evidenciándose una leve subestimación de los asociados a crecidas y una pequeña sobrestimación de los niveles bajos, según se puede observar en la figura 5.53. La serie simulada tiene un coeficiente de correlación superior a 0,98, con un ERMS de 0,22 m, según se muestra en la figura 5.66.

Campichuelo tiene un buen ajuste para la gran mayoría de los niveles, con una leve subestimación de los asociados a crecidas y una pequeña sobrestimación de los bajos, según se puede observar en la figura 5.54. La serie simulada presenta un coeficiente de correlación superior a 0,97, con un ERMS de 0,23 m, como se muestra en la figura 5.67.

Fray Bentos presenta un buen ajuste de los niveles, tendiendo a sobrestimar en cierta medida los niveles asociados a caudales de entre 10.000 a 20.000 m^3/s en eventos de crecida prolongados, como los observados en mayo y junio de 2005, como se muestra en la figura 5.55. La serie simulada tiene un coeficiente de correlación superior a 0,98, con un ERMS de 0,11 m, según se puede ver en la figura 5.68.

Gualeguaychú muestra un comportamiento similar al de Fray Bentos, lo cual se puede apreciar en la figura 5.56. La serie simulada presenta un coeficiente de correlación superior a 0,93, con un ERMS de 0,21 m, según se puede ver en la figura 5.69.

Nueva Palmira tiene un buen ajuste de los niveles, tendiendo a sobrestimar levemente los asociados a caudales de entre 10.000 a 20.000 m^3/s en eventos de crecida prolongados, como se puede ver en la figura 5.57. La serie simulada presenta un coeficiente de correlación superior a 0,98, con un ERMS de 0,07 m, según se muestra en la figura 5.70.

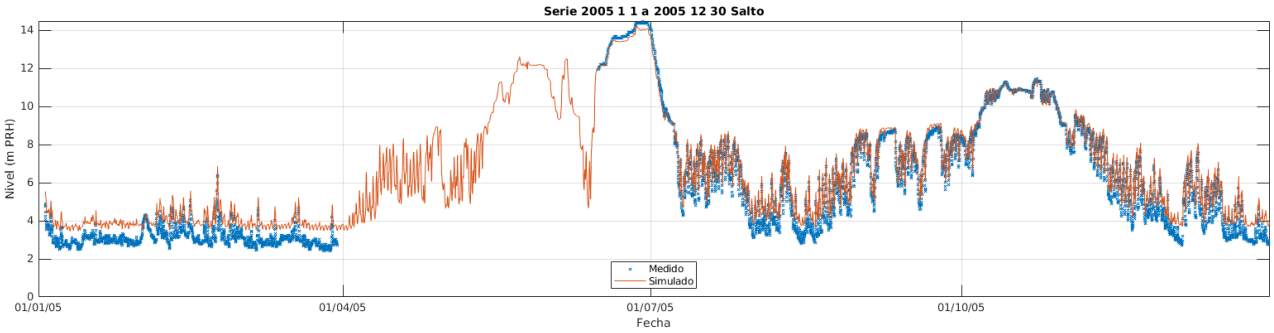


Figura 5.45: Series de niveles medidas y simuladas - Salto - 2005.

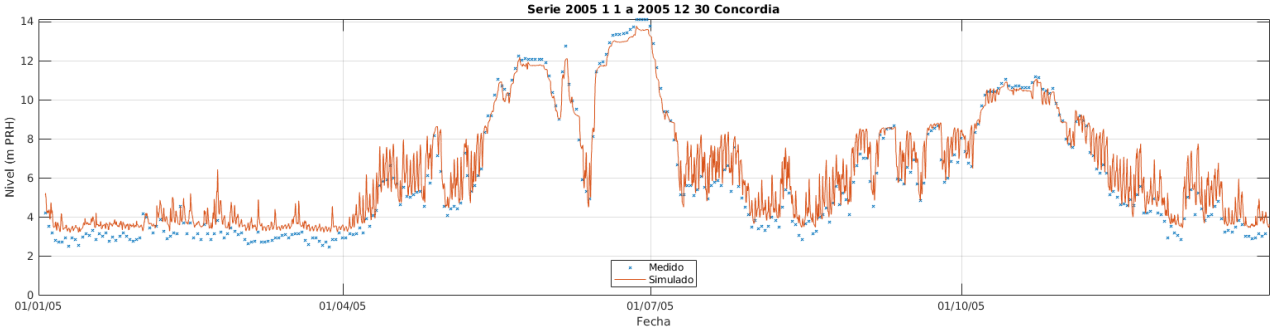


Figura 5.46: Series de niveles medidas y simuladas - Concordia - 2005.

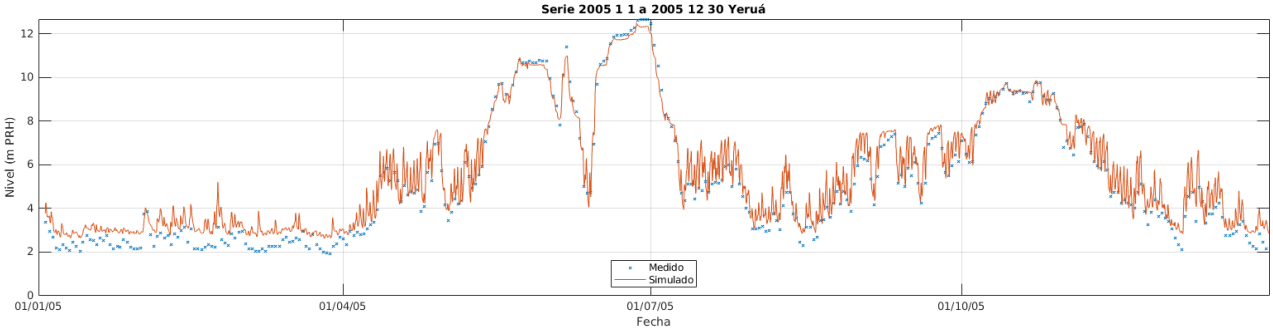


Figura 5.47: Series de niveles medidas y simuladas - Yeruá - 2005.

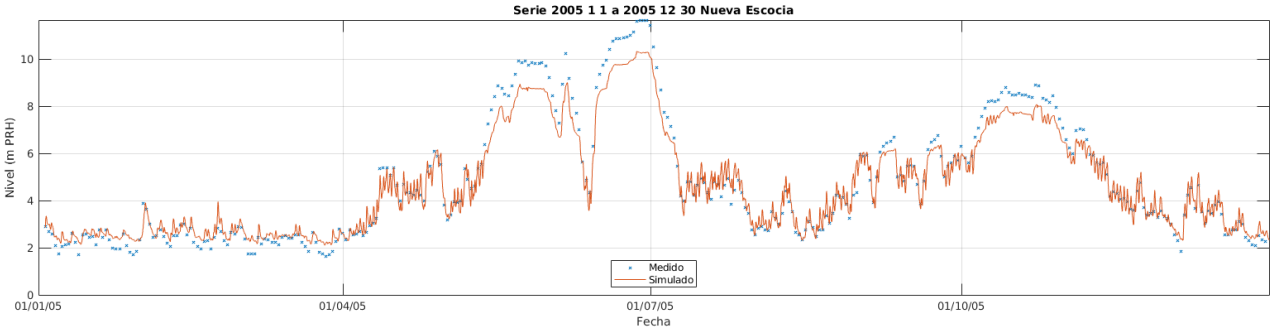


Figura 5.48: Series de niveles medidas y simuladas - Nueva Escocia - 2005.

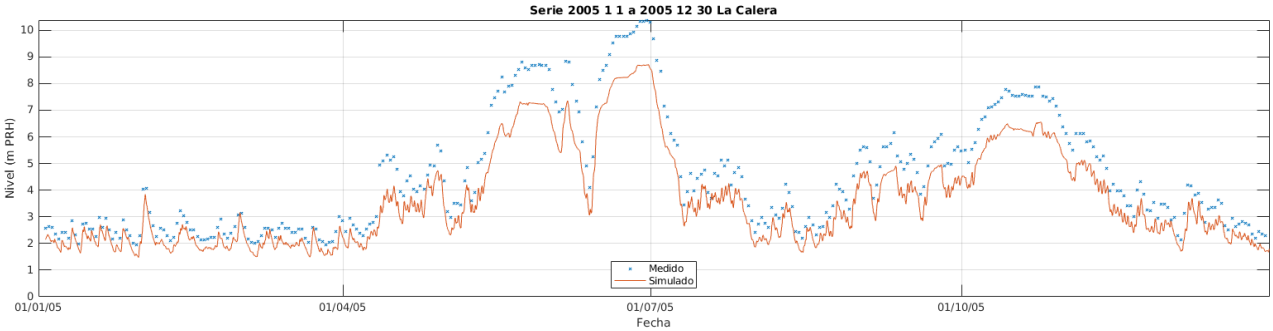


Figura 5.49: Series de niveles medidas y simuladas - La Calera - 2005.

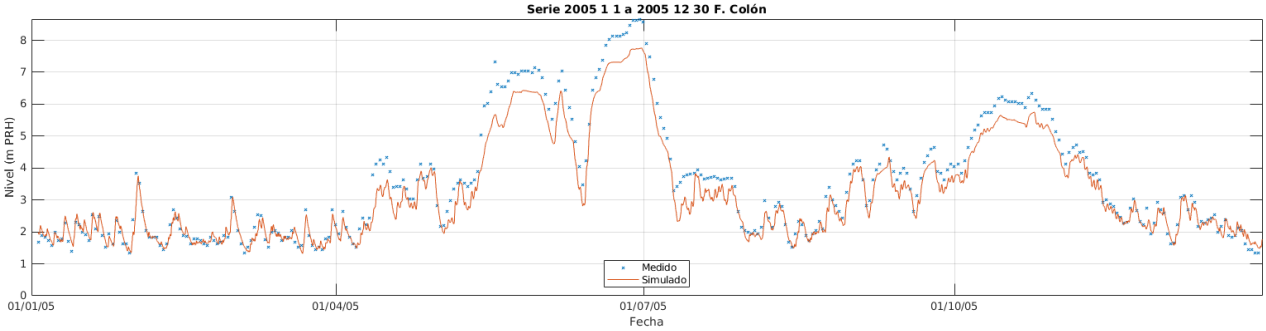


Figura 5.50: Series de niveles medidas y simuladas - Fábrica Colón - 2005.

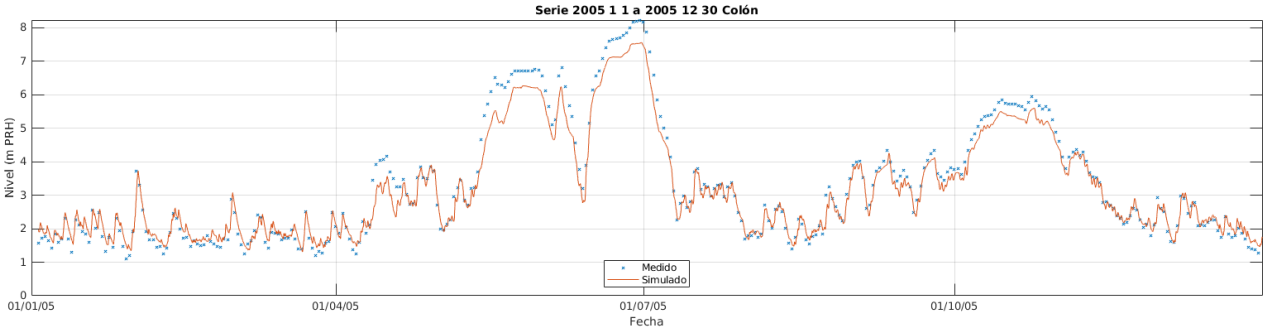


Figura 5.51: Series de niveles medidas y simuladas - Colón - 2005.

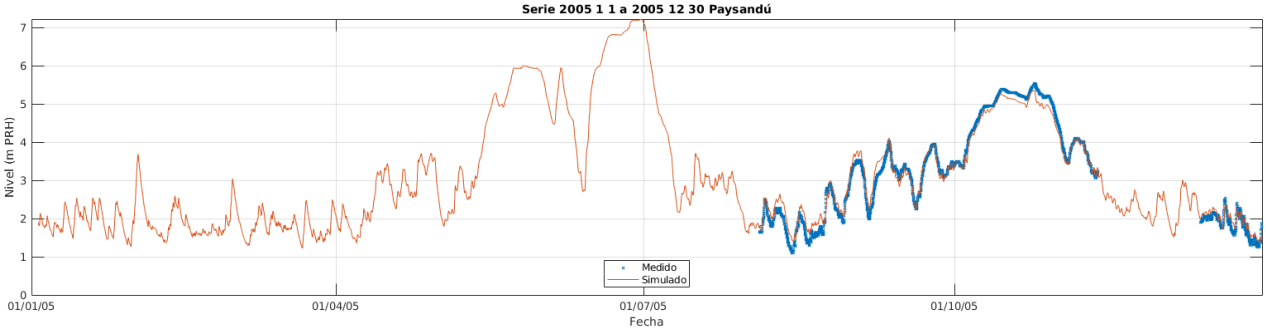


Figura 5.52: Series de niveles medidas y simuladas - Paysandú - 2005.

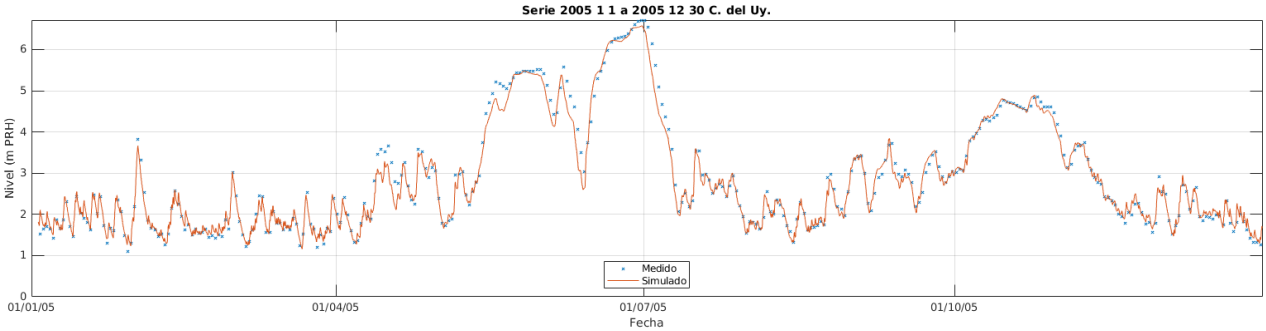


Figura 5.53: Series de niveles medidas y simuladas - Concepción del Uruguay - 2005.

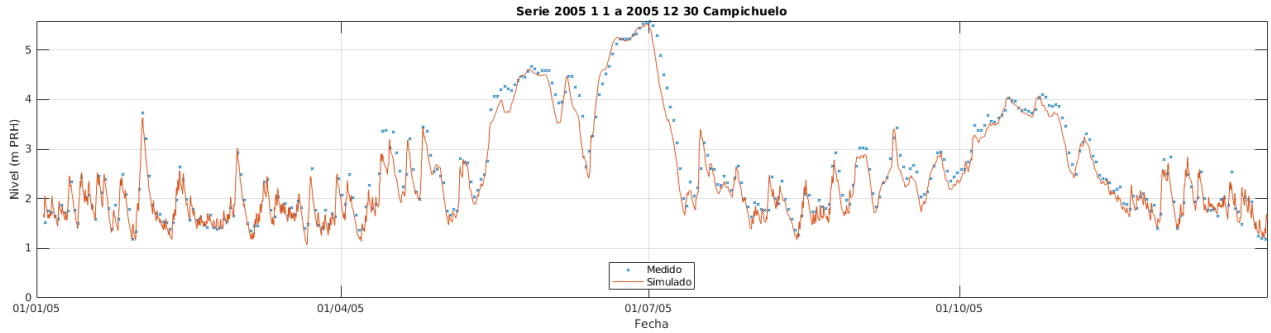


Figura 5.54: Series de niveles medidas y simuladas - Campichuelo - 2005.

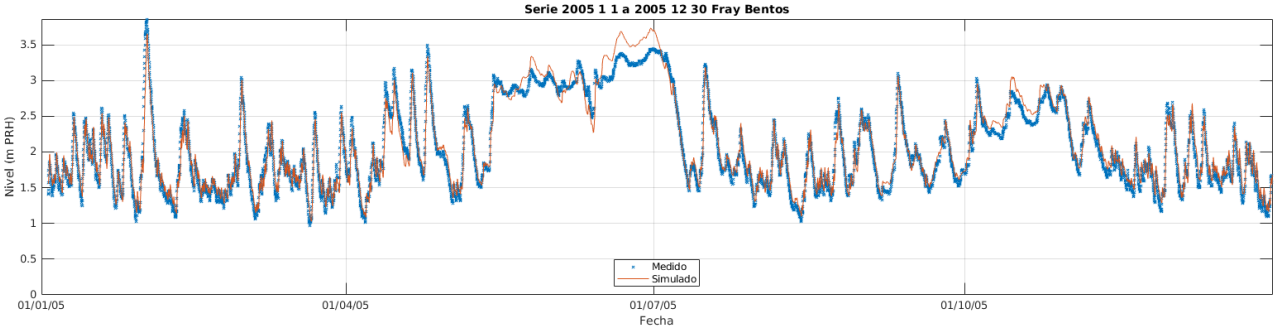


Figura 5.55: Series de niveles medidas y simuladas - Fray Bentos - 2005.

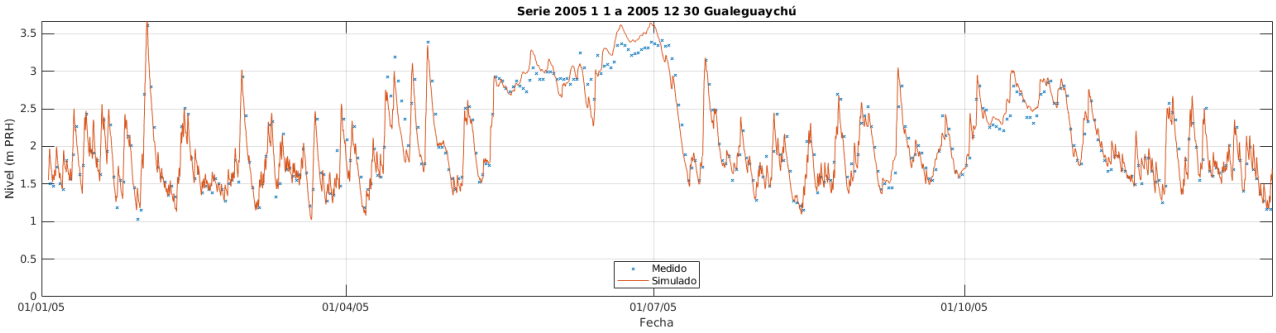


Figura 5.56: Series de niveles medidas y simuladas - Gualeguaychú - 2005.

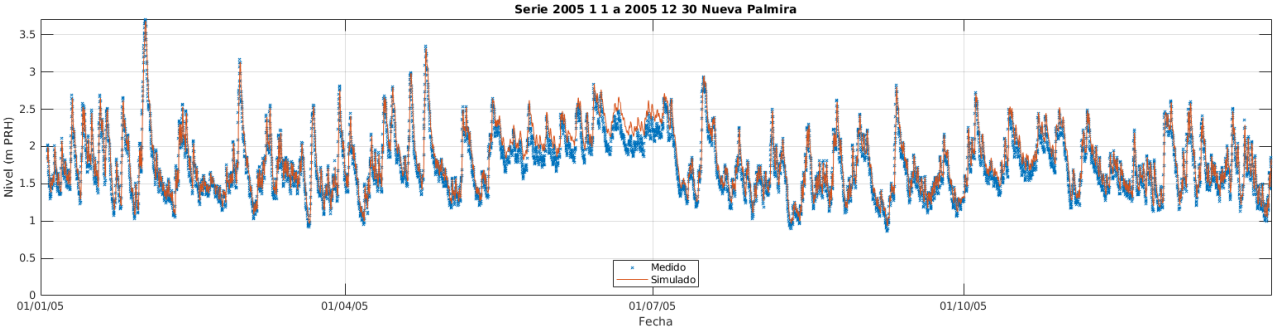


Figura 5.57: Series de niveles medidas y simuladas - Nueva Palmira - 2005.

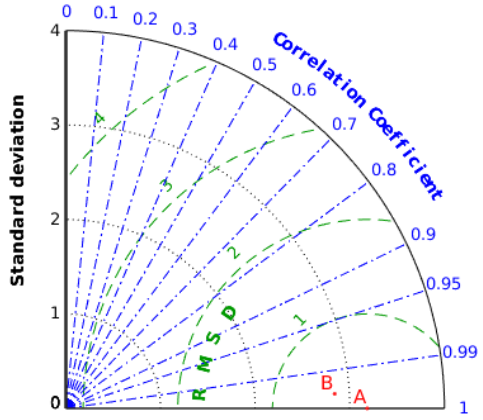


Figura 5.58: Diagrama de Taylor - Salto - 2005.

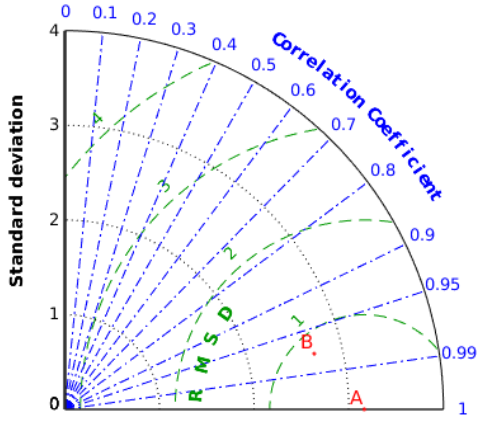


Figura 5.59: Diagrama de Taylor - Concordia - 2005.

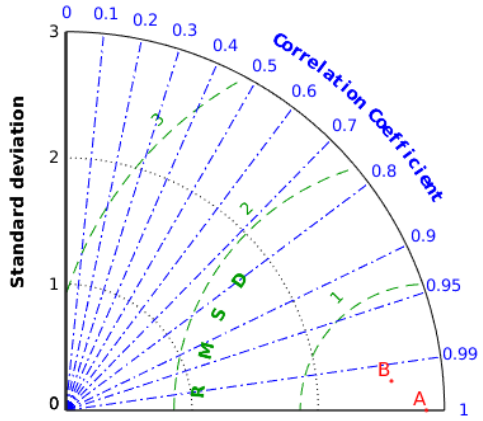


Figura 5.60: Diagrama de Taylor - Yeruá - 2005.

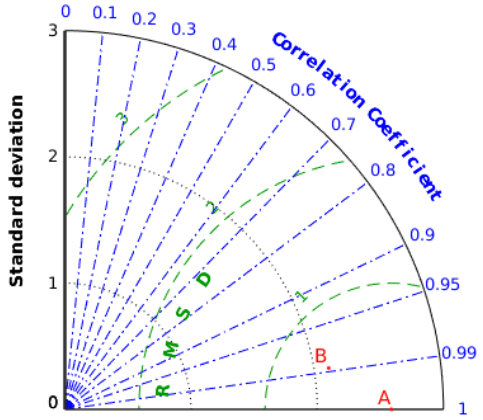


Figura 5.61: Diagrama de Taylor - Nueva Escocia - 2005.

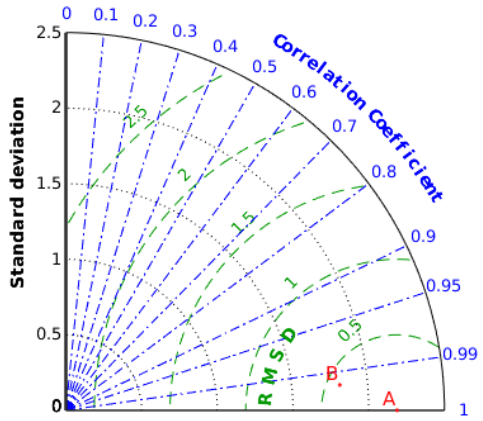


Figura 5.62: Diagrama de Taylor - La Calera - 2005.

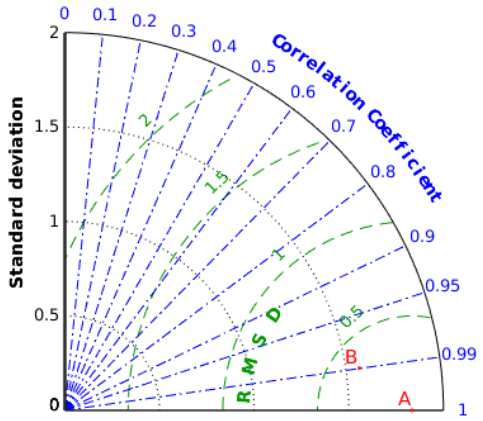


Figura 5.63: Diagrama de Taylor - Fábrica Colón - 2005.

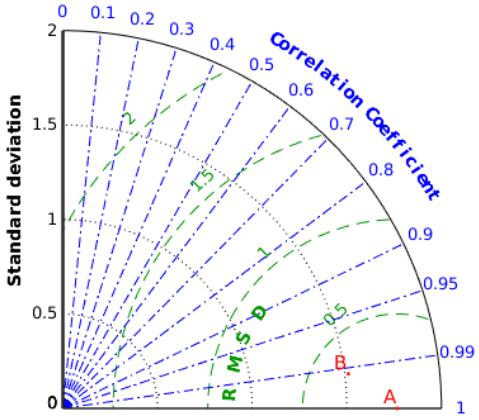


Figura 5.64: Diagrama de Taylor - Colón - 2005.

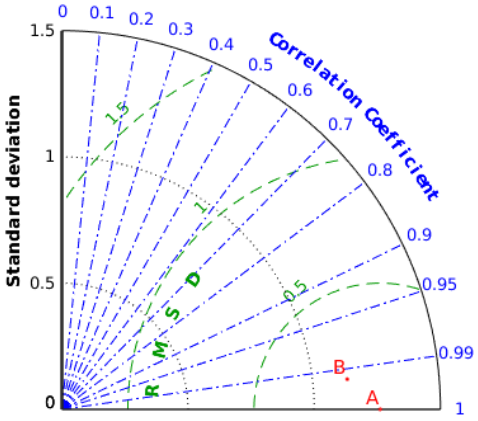


Figura 5.65: Diagrama de Taylor - Paysandú - 2005.

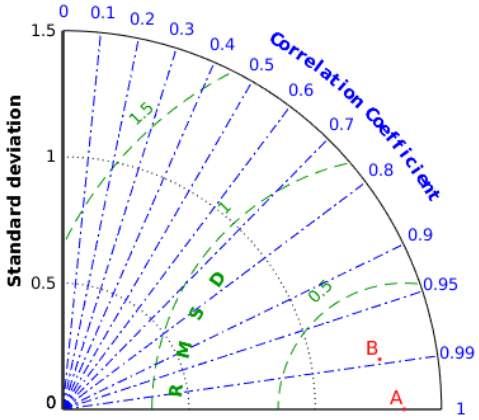


Figura 5.66: Diagrama de Taylor - Concepción del Uruguay - 2005.

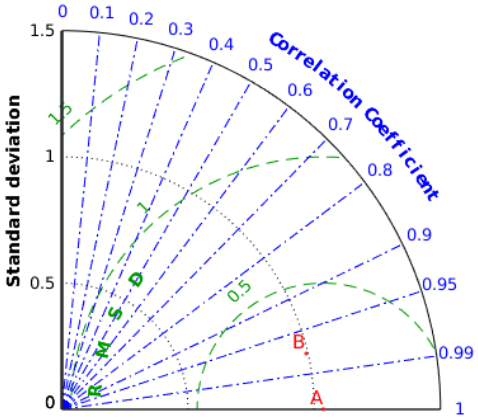


Figura 5.67: Diagrama de Taylor - Campichuelo - 2005.

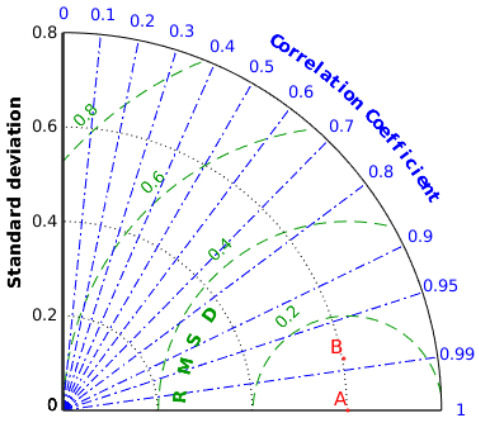


Figura 5.68: Diagrama de Taylor - Fray Bentos - 2005.

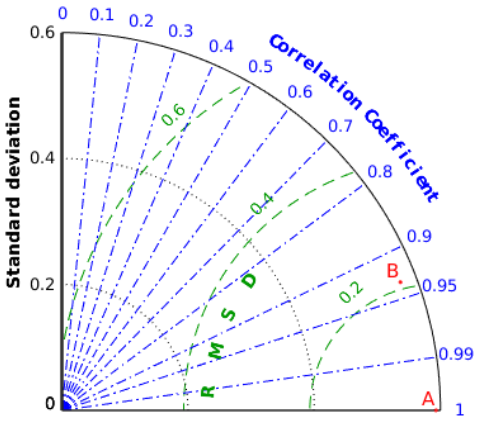


Figura 5.69: Diagrama de Taylor - Gualeguaychú - 2005.

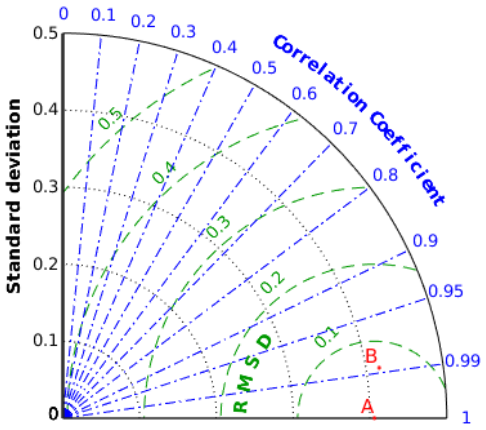


Figura 5.70: Diagrama de Taylor - Nueva Palmira - 2005.

De los resultados obtenidos en la etapa de validación de niveles se puede concluir que el modelo hidrodinámico implementado los logra representar de forma satisfactoria para el año 2005, presentando un comportamiento similar al año utilizado para la calibración en términos del ajuste de las distintas estaciones hidrométricas.

En todas las estaciones de registro de niveles la comparación con los datos simulados arroja coeficientes de correlación altos, superiores a 0,93 en todos los casos y generalmente en el rango de 0,98 a 0,99 (ver figura 5.71, izquierda). El máximo ERMS es de 0,79 m en Concordia, con un ERMS medio de 0,33 m (ver figura 5.71, centro). Las estaciones de Salto, Concordia, Yeruá y Nueva Escocia presentan sesgos positivos, indicando que la mayoría del tiempo se tiende a sobrestimar el nivel en las mismas. Por otro lado, La Calera, Fábrica Colón y Colón presentan sesgos negativos. El sesgo en el resto de las estaciones es inferior a los 10 cm (ver figura 5.71, derecha). De la figura 5.71 también se puede concluir que las estaciones mejor representadas por el modelo son las que se encuentran aguas abajo de Paysandú inclusive, ya que tiene los menores ERMS, mayores coeficientes de correlación (excepto por Gualeguaychú), y sesgos más cercanos a cero. Se observa asimismo una diferencia sistemática entre el comportamiento de estos indicadores en la estación de Concordia y las estaciones inmediatamente aguas arriba y abajo (Salto y Yeruá, respectivamente), donde Concordia presenta peores resultados que las otras. Esto podría deberse a algún tipo de error en los registros de las mediciones, aunque en la comparación de gráficos temporales no es evidente un desfase sistemático entre los datos medidos y simulados (ver figura 5.46).

Los primeros 4 meses del año simulado corresponden a caudales bajos de Salto Grande, usualmente inferiores a 1.000 m^3/s y con un solo pico por encima de 5.000 m^3/s. Durante este período se dan dos picos de marea meteorológica registrados en los niveles de Nueva Palmira, el 31 de enero y el 28 de febrero de 2005, asociados a un evento de viento del Suroeste con un pico de 11 m/s y otro de viento Sureste con un pico de 7 m/s, respectivamente. En las series de niveles simuladas se puede observar el avance de esta onda de marea meteorológica río arriba,

llegando a distinguirse claramente los picos asociados a la misma hasta la estación de Nueva Escocia inclusive, haciéndose más difusos aguas arriba de ese punto. Estos eventos muestran la extensión de la influencia de la marea meteorológica del Río de la Plata en el río Uruguay, especialmente en momentos de caudales bajos en Salto Grande, lo que el modelo logra captar de forma certera. Dejan en evidencia también que el comportamiento de los niveles registrados en las estaciones del Tramo 1, Salto, Concordia y Yeruá, dependen en mucho mayor grado del caudal erogado por Salto Grande que de la condición de borde de niveles en Nueva Palmira, lo cual es respaldado por el análisis estadístico de los datos de registro de niveles y caudales (ver apéndice 1).

En la tabla 5.5 se presenta un resumen de los estadísticos utilizados como parte de la evaluación de calidad del ajuste, donde se puede ver que en general este es muy satisfactorio, presentando los menores ERMS en las estaciones de Paysandú, Fray Bentos y Nueva Palmira. Los coeficientes de correlación más altos se observan en las estaciones próximas a las condiciones de contorno, esto es, Salto y Nueva Palmira, así como también en las estaciones de La Calera a Paysandú inclusive. Se observa que La Calera presenta un sesgo negativo prácticamente constante, mientras que las estaciones al Norte de ésta presentan un sesgo positivo, más bien asociado a caudales bajos, y las estaciones al Sur un sesgo muy cercano a cero.

Estación	ERMS	CCor	Sesgo	Media (m PRH)		STD (m)	
	(m)	-	(m)	Medida	Simulada	Medida	Simulada
Salto	0,38	0,999	0,49	6,01	6,81	3,18	2,84
Concordia	0,79	0,976	0,88	6,02	6,56	3,16	2,70
Yeruá	0,36	0,996	0,33	5,26	5,71	2,86	2,59
Nueva Escocia	0,59	0,988	0,01	4,86	4,72	2,59	2,12
La Calera	0,41	0,996	-0,83	4,55	3,70	2,19	1,82
F. Colón	0,36	0,990	-0,31	3,57	3,26	1,83	1,57
Colón	0,32	0,993	-0,13	3,32	3,20	1,77	1,52
Paysandú	0,18	0,994	0,03	3,21	3,09	1,26	1,14
C. del Uruguay	0,22	0,988	-0,02	2,90	2,86	1,35	1,27
Campichuelo	0,23	0,975	-0,09	2,62	2,51	1,04	0,99
Fray Bentos	0,11	0,983	0,03	2,08	2,11	0,60	0,60
Gualeguaychú	0,21	0,935	0,01	2,09	2,09	0,59	0,57
Nueva Palmira	0,07	0,988	0,06	1,75	1,82	0,41	0,42

Tabla 5.5: Resumen de indicadores de calidad de ajuste y parámetros estadísticos de comparación entre series medidas y simuladas para 2005.

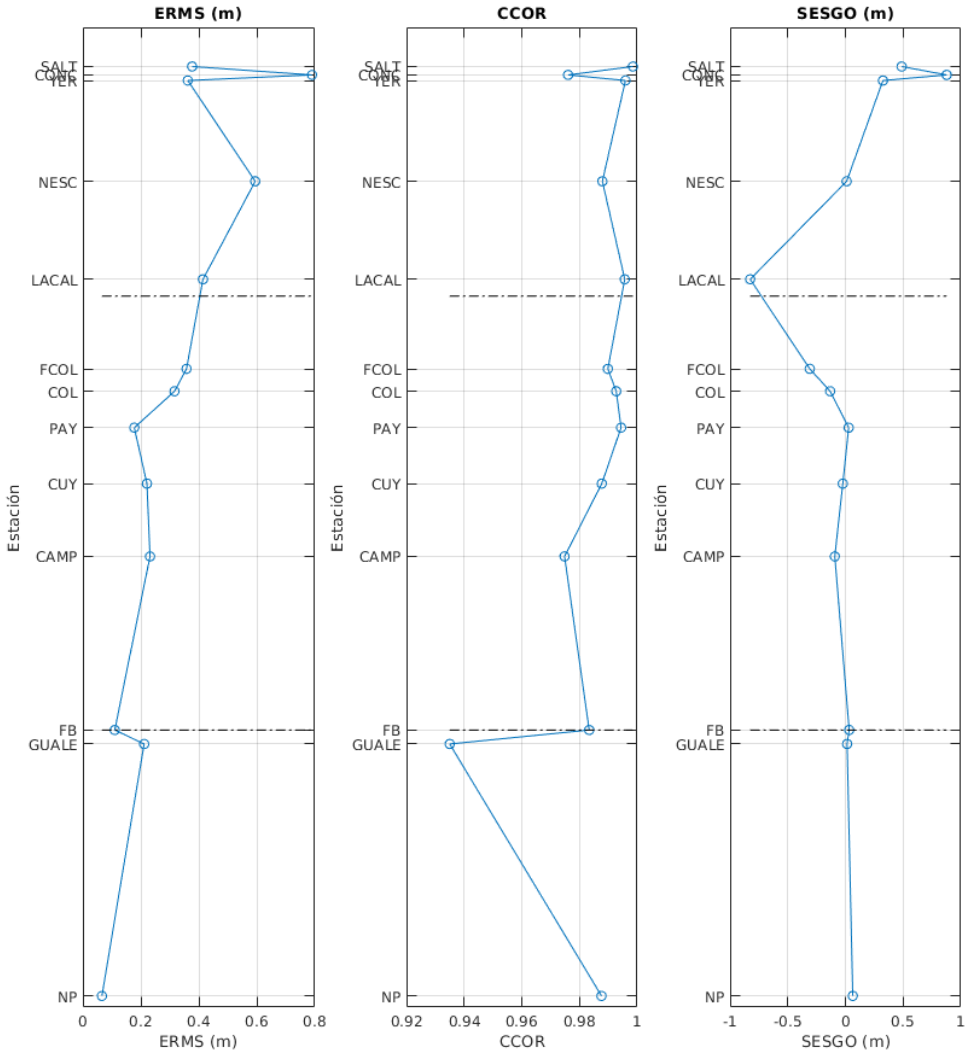


Figura 5.71: ERMS, coeficiente de correlación y sesgo para las distintas estaciones, período de validación, año 2005. La ubicación de las estaciones en el eje vertical es proporcional a la progresiva del río en la que se encuentran. Las líneas punteadas horizontales indican las transiciones entre los 3 tramos del río considerados en la calibración.

5.4. Validación de velocidades

De modo de contar con una indicación cualitativa del comportamiento del modelo hidrodinámico, se comparan los resultados con las velocidades medidas, utilizando gráficos de dispersión de velocidad-caudal. Cabe señalar que para la comparación se utiliza la componente de la velocidad perpendicular a la transecta correspondiente, tanto para los datos medidos como para los simulados, llamándola "velocidad longitudinal".

Para esto, se extraen los datos de velocidad y caudal, con paso de 1 hora, de los resultados de simulación para el año 2005, utilizado para la validación. Las transectas para la extracción de los datos del modelo se ubican en el mismo lugar y con la misma orientación promedio que las

8 transectas de los subgrupos de relevamientos de ADCP con más instancias de relevamiento, específicamente: km 348, km 317, km 230, km 214, km 140 brazo Oeste, km 140 brazo Este, km 105 y km 9, las cuales se muestran de la figura 5.72 a la figura 5.79 respectivamente. Cabe señalar que las mediciones de ADCP no coinciden en el tiempo con los datos extraídos del modelo, razón por la cual no se hace una comparación directa entre los perfiles de velocidad. En las figuras mencionadas anteriormente se muestra asimismo una comparación entre la batimetría de las secciones relevadas y del modelo. Esta comparación se hace en términos cualitativos, restando la media de la profundidad de cada una de las transectas, de modo que sean comparables más allá del nivel de superficie libre al momento del relevamiento. En la horizontal, se alinean las transectas por su punto medio.

Tomando en cuenta las salvedades anteriores, esta comparación permite observar algunas diferencias entre las profundidades relevadas y las implementadas en el modelo. Las mejores coincidencias se dan en las secciones del km 348 y km 230 (figuras 5.72 y 5.74), donde la geometría y la profundidad media son representadas adecuadamente por la batimetría del modelo. En las secciones restantes se observan diferencias tanto en la forma como en las proporciones. Estos apartamientos de la batimetría del modelo respecto a la sección real pueden redundar en diferencias de los campos de velocidades y patrones de circulación locales. Lo anterior muestra asimismo la importancia de contar con información de batimetría certera y con suficiente densidad al momento de implementar un modelo hidrodinámico, de modo de evitar compensar estas carencias con valores poco razonables de los parámetros de calibración, principalmente de la fricción de fondo.

En base a los datos de simulación extraídos, se generan gráficos de dispersión de velocidad máxima, media y mínima en la sección contra caudal pasante simulado. Sobre los gráficos para cada sección se superponen los valores correspondientes de las mediciones realizadas con ADCP, contra el caudal pasante relevado. Los gráficos resultantes se presentan de la figura 5.72c a la 5.79c.

Para el km 348, mostrado en la figura 5.72c, se puede ver que las velocidades medias y máximas medidas ajustan razonablemente el comportamiento simulado, mientras que las velocidades mínimas presentan las mayores desviaciones. En esta sección la batimetría utilizada en el modelo coincide en términos generales con la relevada mediante ADCP. En el caso del km 317 (ver figura 5.73c), el modelo presenta velocidades máximas en la sección mayores a las medidas con ADCP, comportamiento el cual se repite para las velocidades medias a partir de los 5.000 m^3/s de caudal pasante aproximadamente. Las velocidades mínimas presentan una buena correspondencia. La batimetría del modelo coincide ampliamente con la relevada mediante ADCP, observándose sin embargo que el canal principal es menos profundo en la primera, presentando un fondo más llano, y una menor pendiente del talud de la margen derecha.

El km 230 (ver figura 5.74c) presenta un buen ajuste de las velocidades medias para valores

de caudal inferiores a los 5.000 m^3/s, por encima de los cuales las medidas toman valores inferiores a las simuladas, al igual que en el caso de las máximas. Las mínimas presentan una buena correspondencia en caudales altos, encontrándose las medidas por encima de las simuladas en su mayoría, para caudales inferiores a los 5.000 m^3/s. Cabe destacar que el caudal pasante de esta sección es del orden de 3/4 del de las secciones aguas arriba, dado que abarca únicamente el brazo Oeste del río Uruguay. La batimetría del modelo muestra una buena coincidencia con la relevada, observando que el canal de la margen izquierda es más estrecho en los relevamientos, y que existen algunas diferencias entre los canales de la margen derecha.

En el km 214 (ver figura 5.75c) se observa que las velocidades medias y máximas medidas presentan valores similares entre sí, así como una buena coincidencia entre las velocidades medias simuladas y las medidas. Las máximas medidas se encuentran por debajo del valor de las simuladas, mientras que las mínimas presentan una buena correspondencia. La forma de la batimetría del modelo muestra una coincidencia razonable con la relevada por ADCP, viendo que en la última los taludes laterales se extiende a mayor altura respecto al punto de mayor profundidad que en la primera.

El brazo Oeste del km 140 (ver figura 5.76c) presenta velocidades mínimas medidas por encima de las simuladas, mientras que las medias tuvieron una buena correspondencia, al igual que las máximas para el rango de caudales por debajo de los 2.000 m^3/s. La batimetría del modelo en esta sección presenta algunas diferencias en la respecto a la relevada por ADCP, teniendo la última un canal más profundo sobre la margen izquierda, con una elevación más pronunciada en el centro, y taludes más pronunciados sobre la margen derecha. El brazo Este, por su parte (ver figura 5.77c), tiene una buena correspondencia entre velocidades mínimas, medias y máximas, medidas y simuladas, para caudales por debajo de los 5.000 m^3/s, mientras que por encima de este valor las medias y máximas medidas tienden a presentar valores menores a los simulados. La batimetría del modelo en esta sección muestra diferencias con la relevada, teniendo la última un canales más marcados sobre las márgenes, así como una elevación más pronunciada en el centro, y un talud con un coronamiento más elevado sobre la margen izquierda.

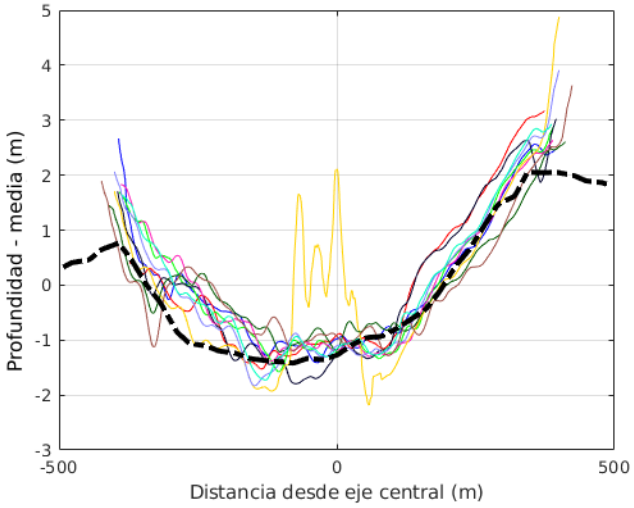
El km 105 (ver figura 5.78c) es el que cuenta con el mayor número de datos medidos. En este se puede ver una muy buena correspondencia entre los valores de velocidad media y máxima medidos con los simulados, incluso para los dos eventos de inversión de flujo registrados en las mediciones. Los valores de velocidad mínima están por encima de los simulados en parte de los casos, mostrando una buena correspondencia en caudales negativos y bajos. La batimetría de la sección del modelo muestra una buena coincidencia con las secciones relevadas mediante ADCP, teniendo éstas últimas una pendiente más pronunciada en el talud de la margen izquierda, con un canal principal más marcado.

En la última transecta, correspondiente al km 9, se tiene una buena correspondencia entre velocidades mínimas y máximas medidas con las simuladas (ver figura 5.79c). Las velocidades

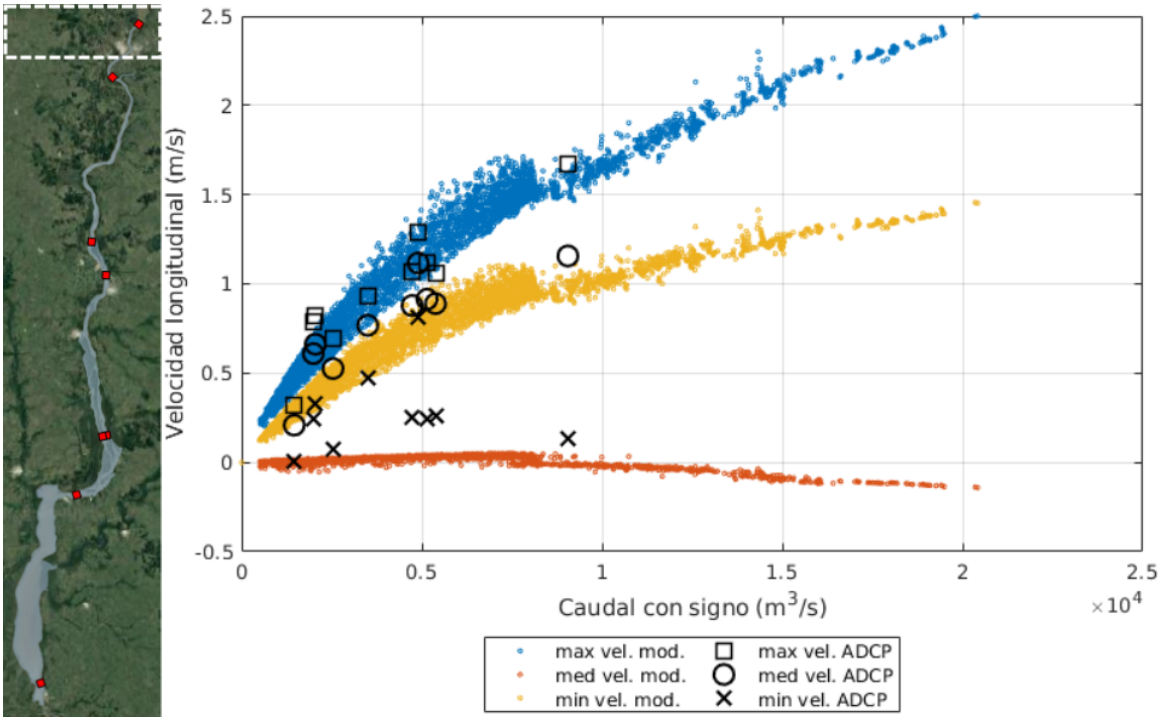
medias medidas se encuentran por encima de las simuladas para caudales superiores a los 10.000 m^3/s. La batimetría del modelo presenta un buen nivel de coincidencia con la relevada, con una diferencia sobre la margen derecha, donde la batimetría relevada presenta un coronamiento más elevado para el borde del canal principal, con un canal secundario menos marcado sobre el borde.

En términos generales, los rangos de velocidad del modelo para las secciones evaluadas muestran una buena coincidencia con los valores medidos, presentando mayores diferencias para valores altos de caudal. Lo anterior puede deberse a las diferencias entre la geometría de las secciones del modelo con respecto a las relevadas, así como una representación no del todo adecuada del perfil de velocidad en planta. Otras razones para estas diferencias pueden estar relacionadas a que el modelo hidrodinámico no incorpora algunos afluentes que podrían aportar un caudal relevante en algunas situaciones, como por ejemplo el río Queguay, cuya confluencia con el río Uruguay se encuentra aguas arriba de la sección km 214.

(a) Transecta km 348.



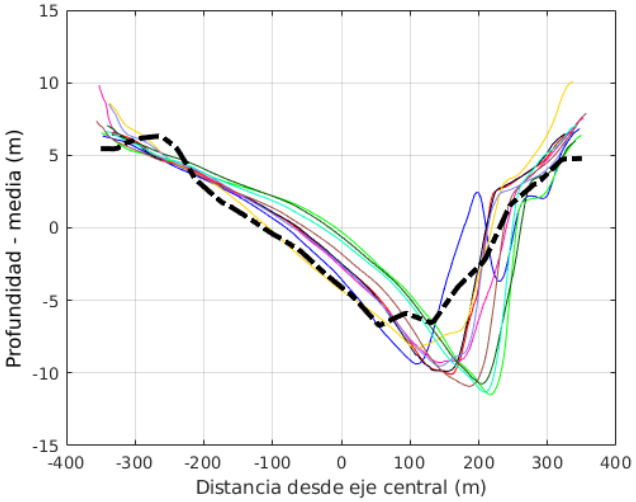
(b) Profundidad km 348. Batimetría del modelo en línea negra punteada. Las restantes corresponden a batimetrías medidas.



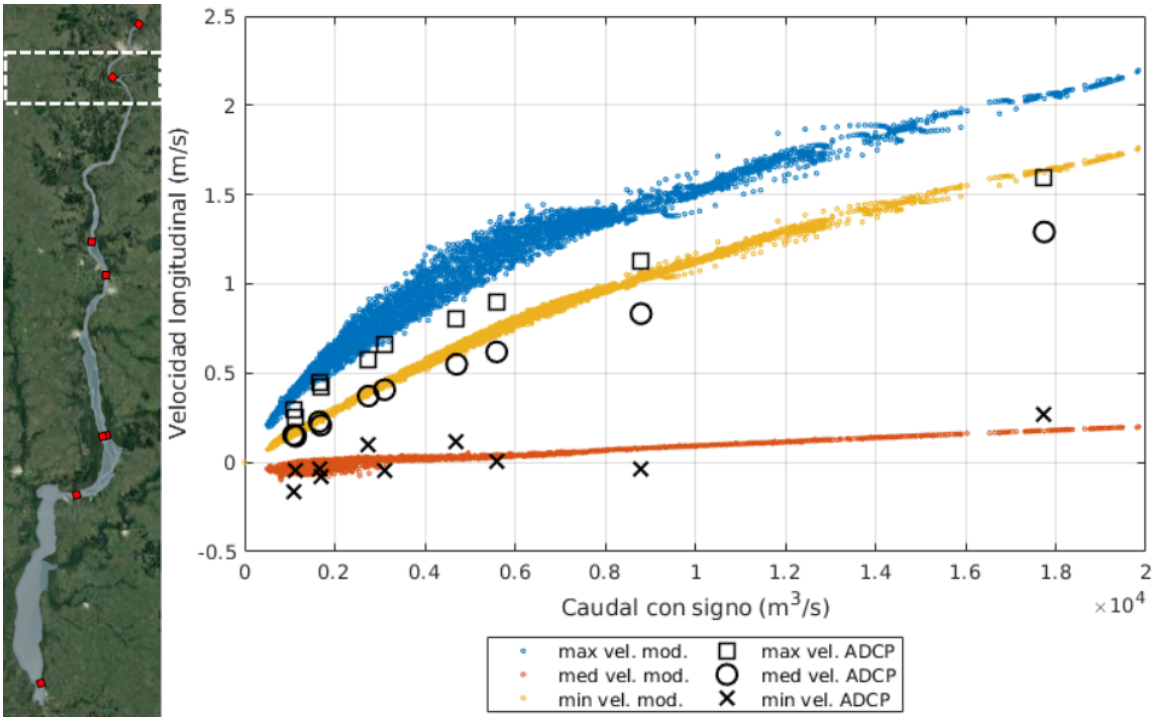
(c) Gráficos de dispersión de velocidad en función del caudal para sección km 348.

Figura 5.72: Izquierda: transecta km 348 para extracción de datos de simulación (en línea roja punteada), en celeste se muestra el dominio de cálculo. Derecha: comparación cualitativa de batimetría relevada por ADCP con batimetría del modelo. Abajo: Gráficos de dispersión de velocidades en función del caudal en la sección comparando datos medidos con simulados.

(a) Transecta km 317.

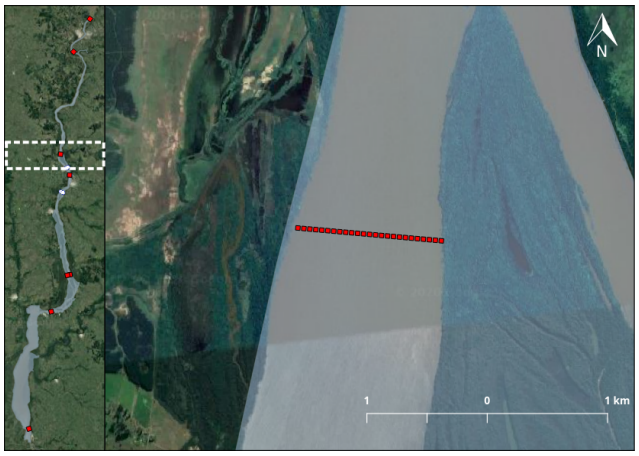


(b) Profundidad km 317. Batimetría del modelo en línea negra punteada. Las restantes corresponden a batimetrías medidas.

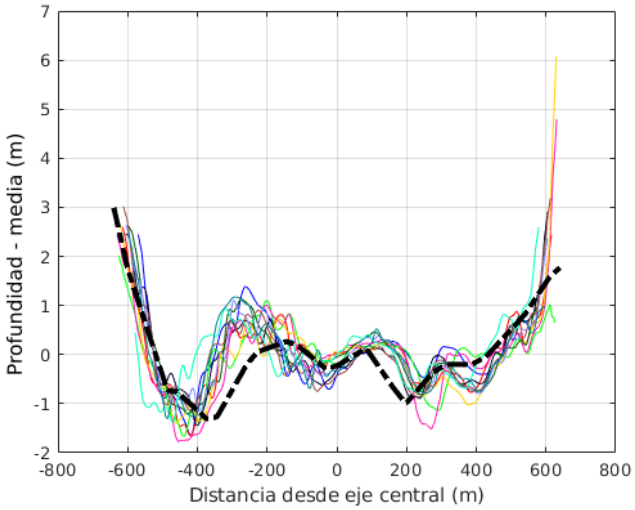


(c) Gráficos de dispersión de velocidad en función del caudal para sección km 317.

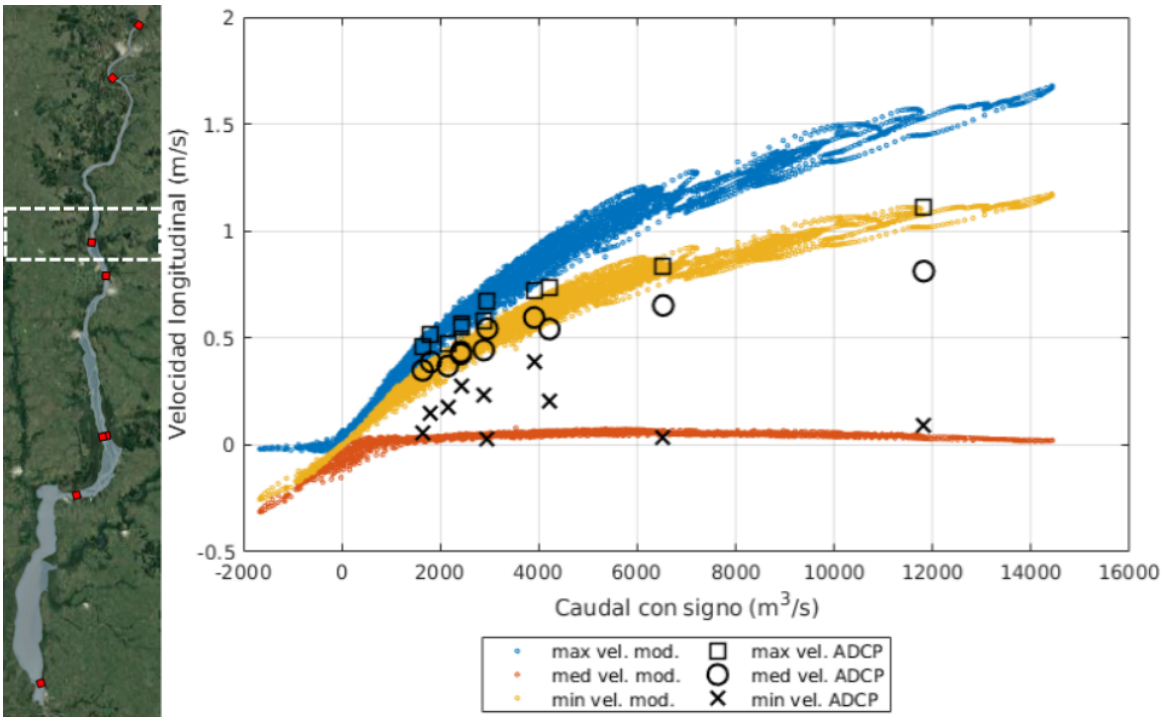
Figura 5.73: Izquierda: transecta km 317 para extracción de datos de simulación (en línea roja punteada), en celeste se muestra el dominio de cálculo. Derecha: comparación cualitativa de batimetría relevada por ADCP con batimetría del modelo. Abajo: Gráficos de dispersión de velocidades en función del caudal en la sección comparando datos medidos con simulados.



(a) Transecta km 230.



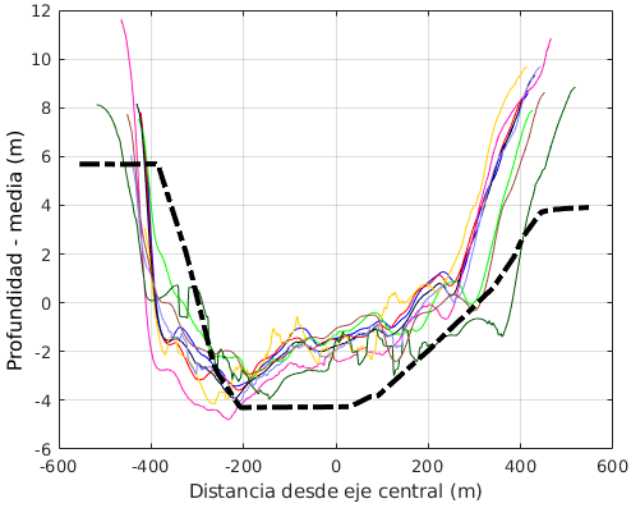
(b) Profundidad km 230. Batimetría del modelo en línea negra punteada. Las restantes corresponden a batimetrías medidas.



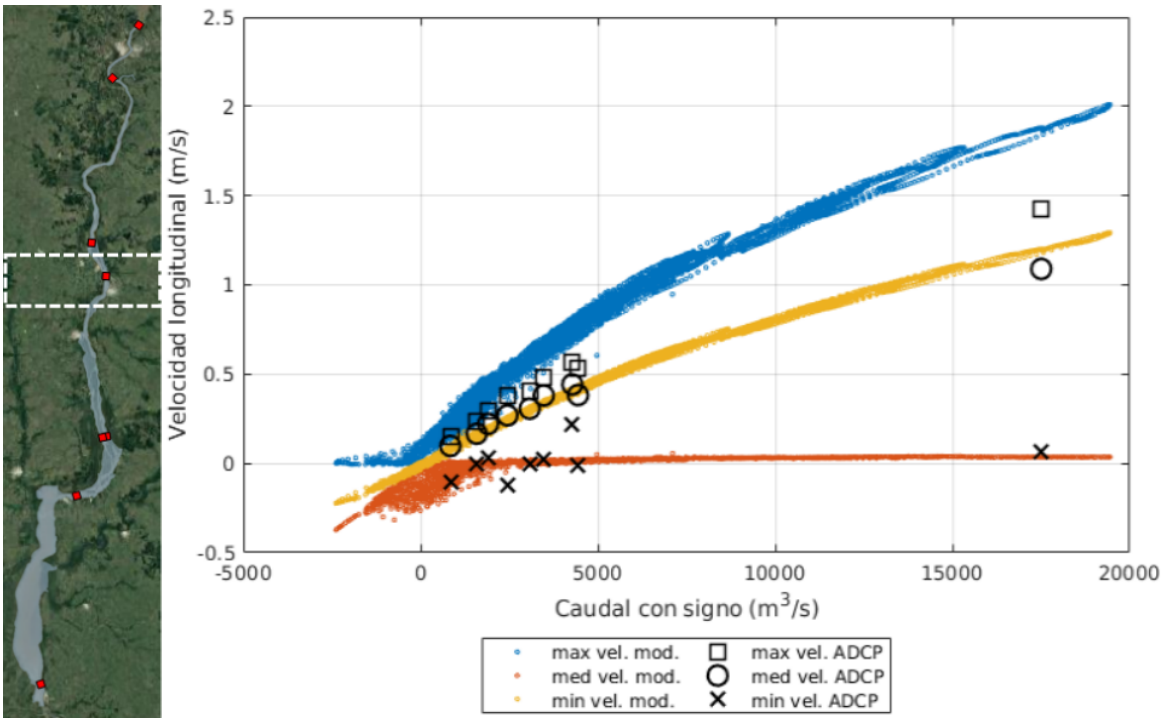
(c) Gráficos de dispersión de velocidad en función del caudal para sección km 230.

Figura 5.74: Izquierda: transecta km 230 para extracción de datos de simulación (en línea roja punteada), en celeste se muestra el dominio de cálculo. Derecha: comparación cualitativa de batimetría relevada por ADCP con batimetría del modelo. Abajo: Gráficos de dispersión de velocidades en función del caudal en la sección comparando datos medidos con simulados.

(a) Transecta km 214.

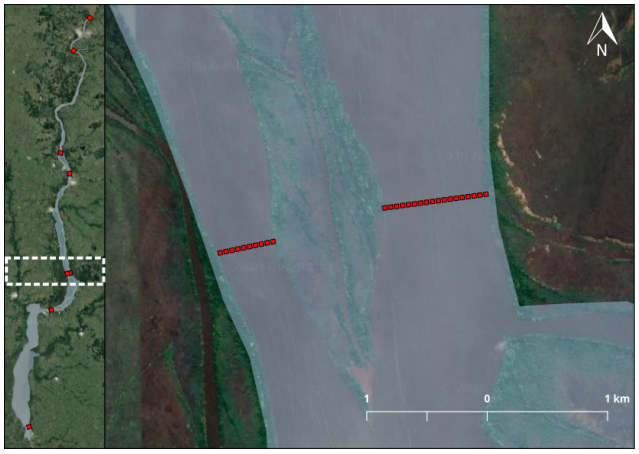


(b) Profundidad km 214. Batimetría del modelo en línea negra punteada. Las restantes corresponden a batimetrías medidas.

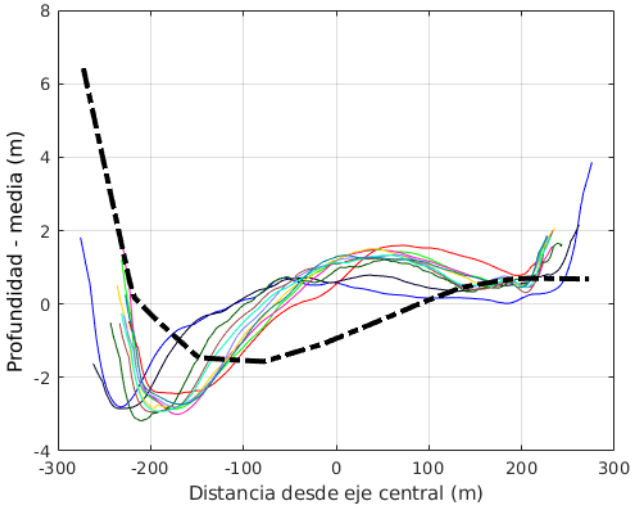


(c) Gráficos de dispersión de velocidad en función del caudal para sección km 214.

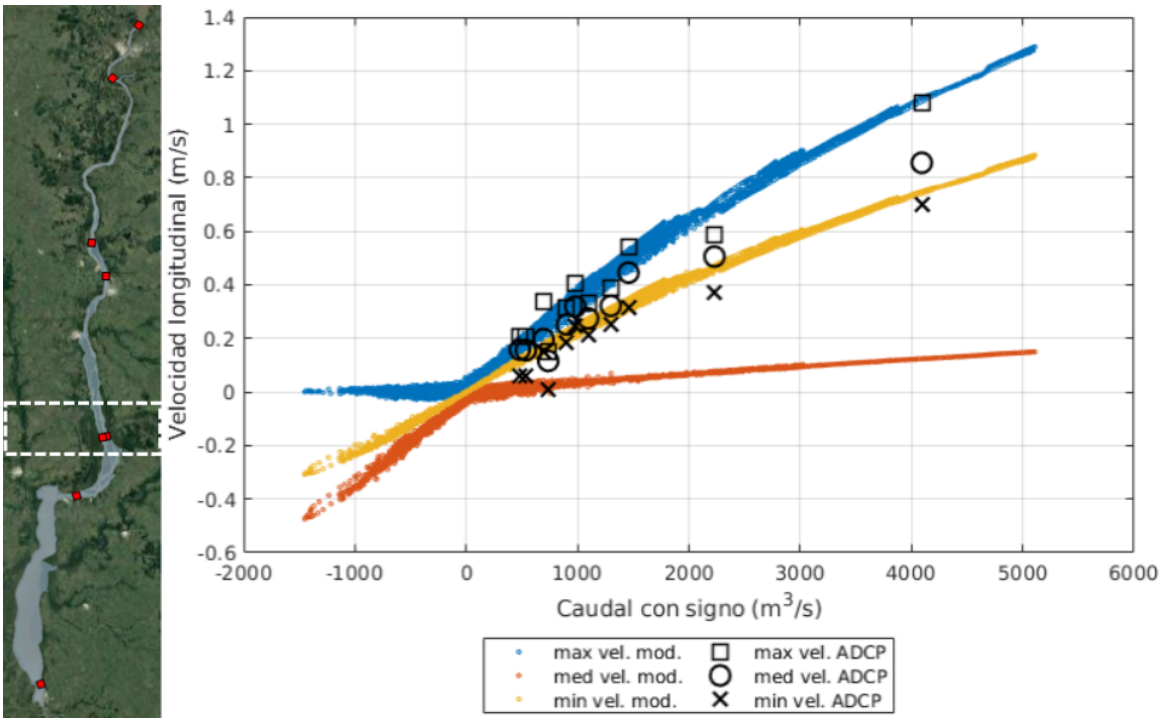
Figura 5.75: Izquierda: transecta km 214 para extracción de datos de simulación (en línea roja punteada), en celeste se muestra el dominio de cálculo. Derecha: comparación cualitativa de batimetría relevada por ADCP con batimetría del modelo. Abajo: Gráficos de dispersión de velocidades en función del caudal en la sección comparando datos medidos con simulados.



(a) Transecta km 140.

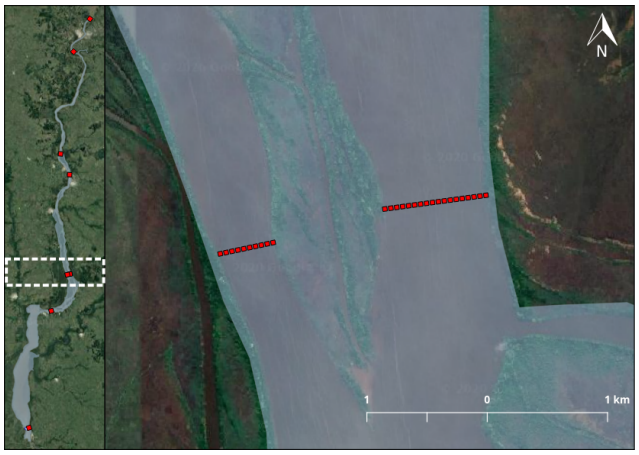


(b) Profundidad km 140, brazo Oeste. Batimetría del modelo en línea negra punteada. Las restantes corresponden a batimetrías medidas.

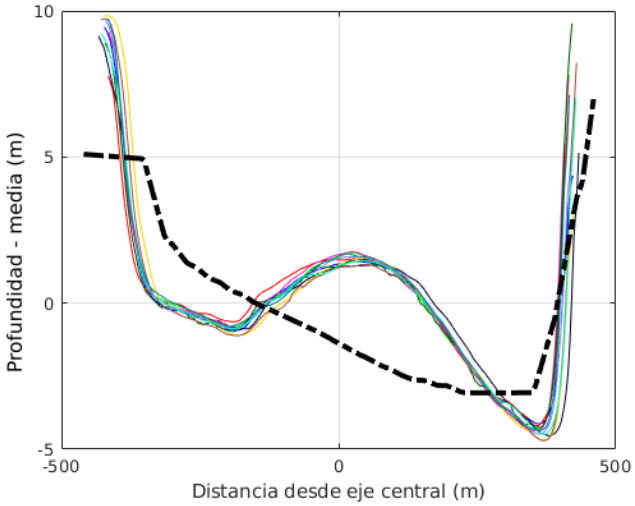


(c) Gráficos de dispersión de velocidad en función del caudal para sección km 140, brazo Oeste.

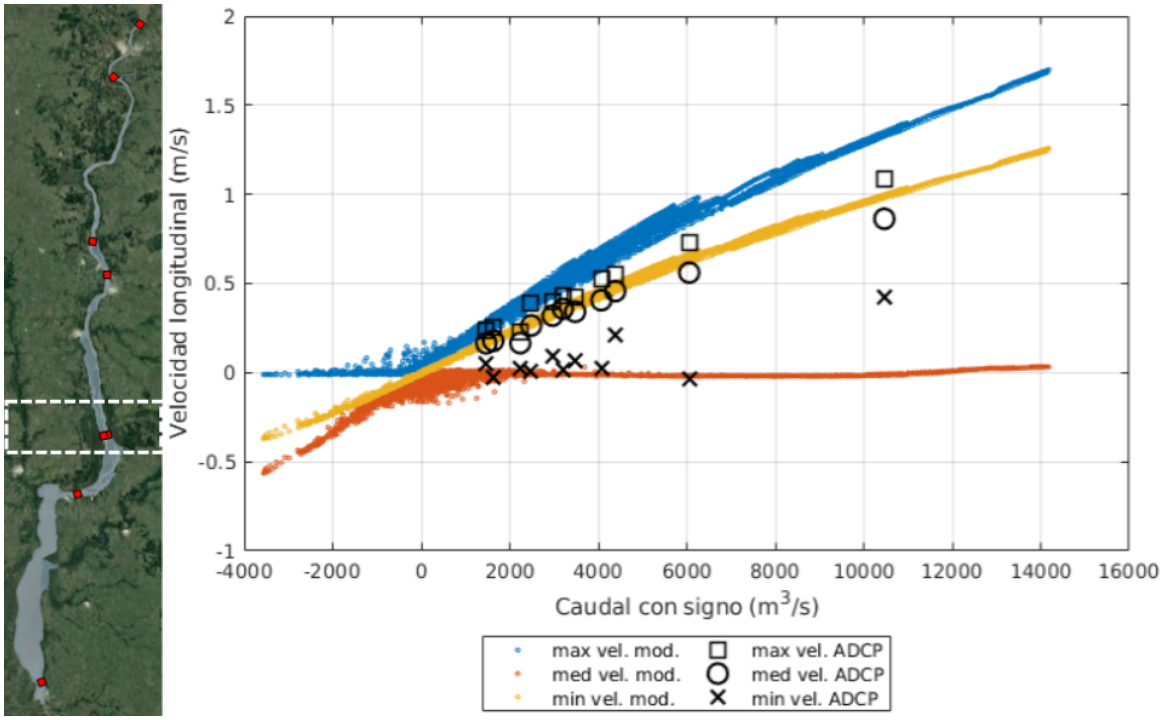
Figura 5.76: Izquierda: transecta km 140 para extracción de datos de simulación (en línea roja punteada), en celeste se muestra el dominio de cálculo. Derecha: comparación cualitativa de batimetría relevada por ADCP con batimetría del modelo, en el brazo Oeste del río. Abajo: Gráficos de dispersión de velocidades en función del caudal en la sección comparando datos medidos con simulados.



(a) Transecta km 140.



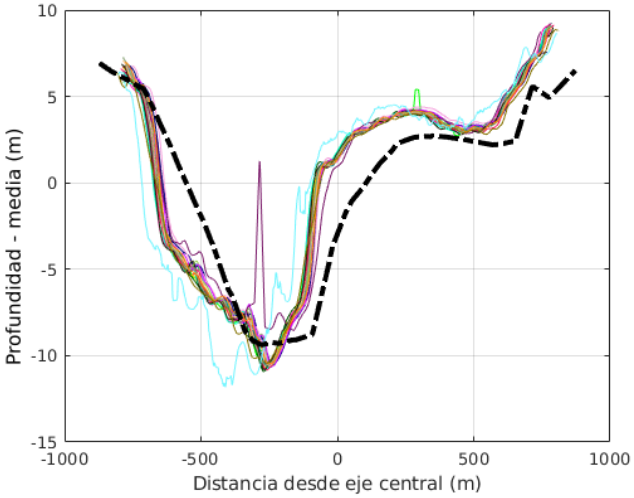
(b) Profundidad km 140, brazo Este. Batimetría del modelo en línea negra punteada. Las restantes corresponden a batimetrías medidas.



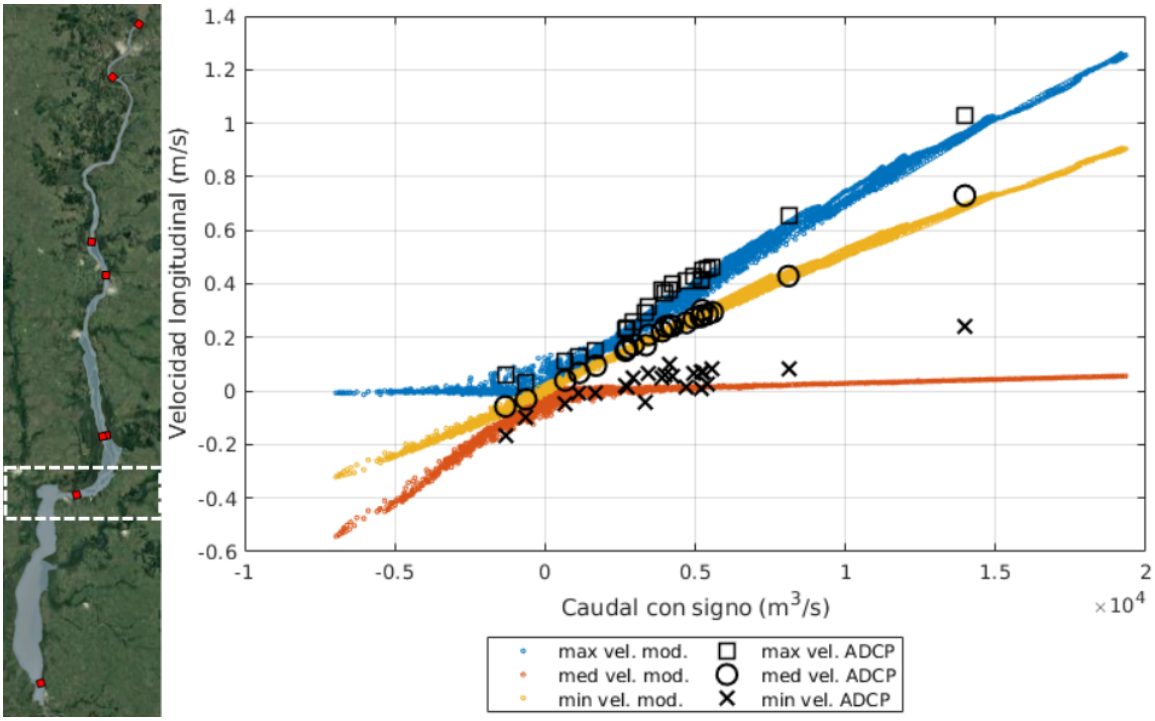
(c) Gráficos de dispersión de velocidad en función del caudal para sección km 140, brazo Este.

Figura 5.77: Izquierda: transecta km 140 para extracción de datos de simulación (en línea roja punteada), en celeste se muestra el dominio de cálculo. Derecha: comparación cualitativa de batimetría relevada por ADCP con batimetría del modelo, en el brazo Este del río. Abajo: Gráficos de dispersión de velocidades en función del caudal en la sección comparando datos medidos con simulados.

(a) Transecta km 105.



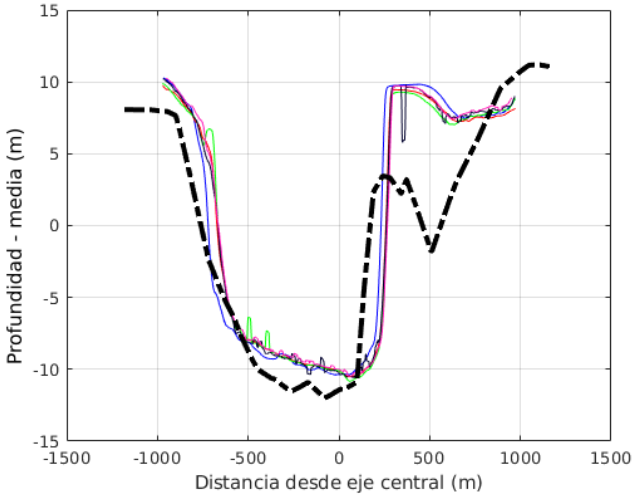
(b) Profundidad km 105. Batimetría del modelo en línea negra punteada. Las restantes corresponden a batimetrías medidas.



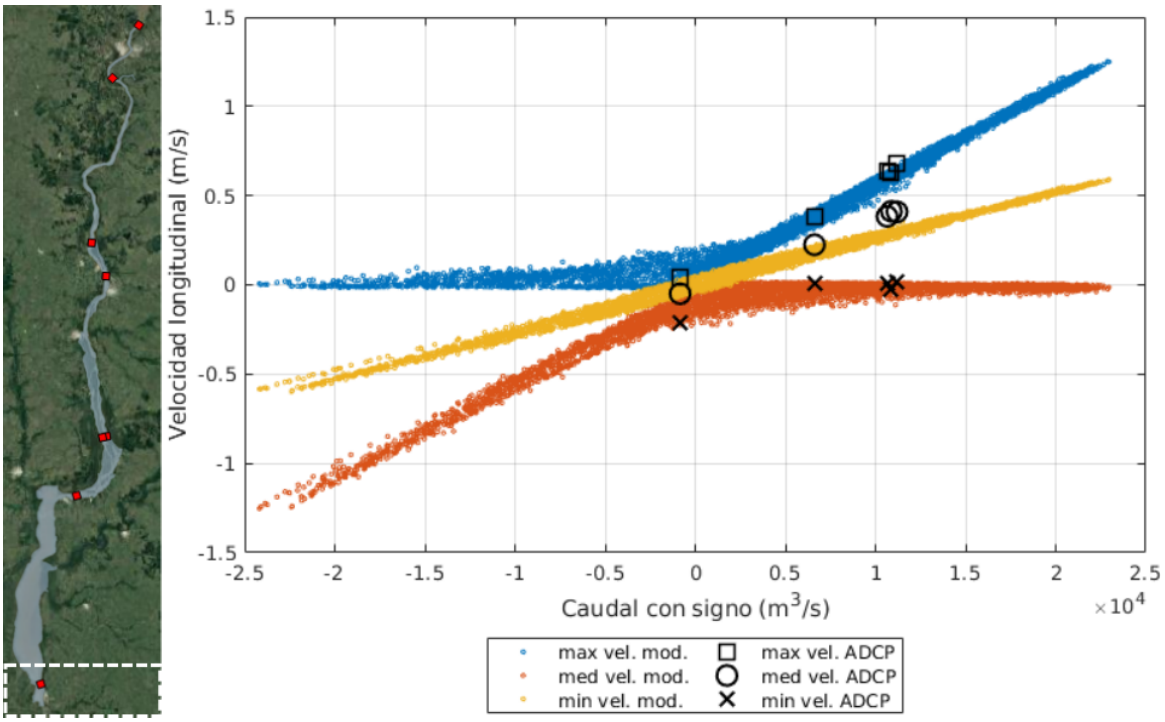
(c) Gráficos de dispersión de velocidad en función del caudal para sección km 105.

Figura 5.78: Izquierda: transecta km 105 para extracción de datos de simulación (en línea roja punteada), en celeste se muestra el dominio de cálculo. Derecha: comparación cualitativa de batimetría relevada por ADCP con batimetría del modelo. Abajo: Gráficos de dispersión de velocidades en función del caudal en la sección comparando datos medidos con simulados.

(a) Transecta km 9.



(b) Profundidad km 9. Batimetría del modelo en línea negra punteada. Las restantes corresponden a batimetrías medidas.



(c) Gráficos de dispersión de velocidad en función del caudal para sección km 9.

Figura 5.79: Izquierda: transecta km 9 para extracción de datos de simulación (en línea roja punteada), en celeste se muestra el dominio de cálculo. Derecha: comparación cualitativa de batimetría relevada por ADCP con batimetría del modelo. Abajo: Gráficos de dispersión de velocidades en función del caudal en la sección comparando datos medidos con simulados.

5.5. Síntesis

El modelo se calibra utilizando una metodología ampliamente aplicada de acuerdo a lo relevado en la revisión de antecedentes. Esta consiste en variar los coeficientes de fricción de fondo de Manning e influencia del viento, comparando las series temporales de nivel de superficie libre medidas en el tramo en estudio con los resultados de cada simulación, para luego aplicar criterios de selección que permitan tomar la combinación de coeficientes que mejor represente los datos observados.

La calibración se realiza de forma secuencial, con datos del año 2008, utilizando primero caudales bajos y medios para determinar los coeficientes de Manning para el cauce, observándose que estos son los que reportan la mayor influencia sobre los resultados obtenidos. Luego, con series temporales de caudales de crecida, se calibra el coeficiente de fricción para la planicie de inundación e islas, para el cual el modelo presenta un menor grado de sensibilidad. Finalmente, se calibra el coeficiente de influencia del viento, siendo este el que genera la menor variabilidad en los resultados del modelo, afectando principalmente la zona del río con mayor ancho, lo que se observa en los resultados de la estación de Fray Bentos. Cabe observar que el valor de coeficiente de Manning para el Tramo 2 es más bajo que lo sugerido por la bibliografía para cuerpos de agua de características similares en términos de morfología y material de fondo, lo cual se entiende es causado por la baja densidad de datos batimétricos en esta zona de geometría particularmente compleja, donde hay varios puntos de concentración de flujo que pueden presentar pérdidas de carga elevadas si la sección transversal del modelo presenta un área menor que la real.

Los resultados de la calibración se consideran satisfactorios, con valores de ERMS de entre 0,4 m a 0,05 m, disminuyendo de Norte a Sur en términos generales (excepto en la estación de Concordia, la cual tiene una frecuencia de medición diaria, donde el ERMS es de 0,7 m). Por su parte, el coeficiente de correlación toma valores muy cercanos a 1 en todas las estaciones excepto Gualeguaychú (donde toma un valor de 0,9 aproximadamente), mientras que el sesgo se mantiene muy cerca de cero para las estaciones aguas abajo de Fábrica Colón, siendo negativo para Fábrica Colón y La Calera, y positivo para las estaciones aguas arriba de esta última.

El modelo por un lado se valida utilizando la misma metodología que para la calibración, esto es, mediante la comparación de series simuladas y medidas de nivel de superficie libre, y por otro, haciendo una comparación cualitativa y cuantitativa de los valores de velocidad longitudinal medidos y simulados en distintos puntos del río.

Para la primer parte de la validación se utiliza la misma metodología y métricas de calidad que para la calibración, obteniendo resultados muy similares en términos de estas, entendiendo por lo tanto que los resultados de la validación son satisfactorios. Cabe destacar que se observa una diferencia sistemática entre los indicadores de la estación de Concordia y las estaciones

inmediatamente aguas arriba y abajo, donde esta presenta peores resultados, lo cual podría deberse a algún tipo de error en los registros de las mediciones.

Posteriormente a las instancias de calibración y validación, se constata la existencia de oscilaciones numéricas en los campos de velocidades y niveles en 5 zonas puntuales de la grilla, para condiciones de caudales y niveles bajos. Todas estas tienen en común la presencia de fuertes variaciones en la batimetría del fondo, con baja densidad de nodos en la grilla de cálculo respecto al ancho del canal y baja densidad y calidad de información batimétrica. Los efectos de estas oscilaciones son netamente locales, dándose en canales secundarios que no influyen en el comportamiento global del modelo.

Para la segunda parte de la validación, se comparan los resultados del modelo con velocidades medidas mediante ADCP, utilizando gráficos de dispersión velocidad-caudal, en los que se superponen las velocidades máxima, media y mínima medidas en cada sección, con las simuladas. Se compara un total de 8 secciones, utilizando los datos de simulación del año 2005, el cual tiene suficiente variabilidad de caudales como para cubrir todos los casos medidos. De este análisis surge que los rangos de velocidad del modelo presentan un buen grado de coincidencia con los valores medidos, dándose las mayores diferencias en situaciones de caudal alto. Lo anterior puede deberse a la diferencia entre la geometría de las secciones relevadas y las del modelo, indicando nuevamente la importancia de contar con datos batimétricos con suficiente densidad y calidad al momento de implementar un modelo hidrodinámico de estas características.

En términos generales, la calibración y validación del modelo son satisfactorias, logrando una buena representación de los niveles de superficie libre en las 13 estaciones de referencia en el tramo de estudio. Los rangos de velocidades del modelo presentan una buena coincidencia con los valores medidos en campo, con las mayores diferencias para valores de caudal alto, observándose diferencias en la geometría de las secciones relevadas y del modelo. En este sentido, se verifica lo indicado por Wagner and Mueller (2001), quienes señalan que un buen ajuste de los niveles de superficie libre no garantiza un buen ajuste de los perfiles de velocidad. Se entiende que la principal causa de las diferencias entre datos medidos y simulados es la baja densidad y calidad de datos batimétricos (incluso la ausencia de estos) en varias zonas del río.

Capítulo 6

Determinación de los principales patrones de flujo

6.1. Introducción

En esta sección se presentan una serie de análisis realizados a los resultados del modelo de manera de caracterizar los patrones de flujo en la zona de estudio. Los datos surgen de una simulación extendida, compuesta de 7 simulaciones de un año de duración cada una, utilizando datos de condiciones de borde entre 2004 a 2010 inclusive. Se utiliza este período de tiempo ya que es el que cuenta con datos en todas las series temporales necesarias para implementar las condiciones de borde del modelo.

En primera instancia se calcula el campo de velocidades promedio para los 7 años simulados, el cual se presenta y analiza en la sección 6.2.

En base a los vectores de velocidad promedio para cada punto de la grilla de cálculo, se obtiene la dirección y sentido promedio de flujo, sobre la cual se proyecta la serie temporal del campo de velocidades para obtener un campo escalar dependiente del tiempo. Esto se utiliza para determinar en cada punto del dominio el porcentaje de tiempo de permanencia del flujo en cada sentido. Este análisis se presenta en la sección 6.3.

Posteriormente, en base a las observaciones de inversiones de flujo, se analiza la propagación aguas arriba de las ondas asociadas a estos eventos en términos de los frentes de velocidad negativa, lo cual se presenta en la sección 6.4. Para este análisis se consideran los datos extraídos de puntos situados sobre el eje del río cada 1 km.

Por último se analizan los patrones de flujo característicos de la zona alrededor de la ciudad de Fray Bentos y la bahía donde desemboca el Gualeguaychú aplicando la metodología de análisis de componentes principales. Esto se presenta en la sección 6.5.

6.2. Campo de velocidades promedio

El campo de velocidades promedio se calcula tomando en cuenta los instantes de tiempo donde las celdas de la grilla de cálculo tienen por lo menos 1 cm de profundidad de agua (i.e. se excluye del promedio los instantes de velocidad nula en una celda si esta está seca, como sucede en las islas y las márgenes del río). El resultado de esto se muestra de la figura 6.1 a la 6.23 para distintos tramos del río.

En la figura 6.1 se puede ver el campo promedio entre las progresivas 350 km y 333 km, esto es, entre Salto Grande, condición de borde de caudales del modelo, y aproximadamente el límite Sur de la ciudad de Salto. Este tramo presenta velocidades promedio relativamente elevadas, con valores entre 1,00 y 1,50 m/s en la zona de Salto Chico, ubicada en las cercanías del límite Norte de la ciudad de Salto, así como en la contracción del cauce que se observa en el límite inferior de la figura, con velocidades promedio superiores a 1,50 m/s, formando asimismo una zona de recirculación sobre la margen argentina, con velocidades más bajas, del orden de los 0,20 m/s. Esta sección se encuentra muy cerca de la condición de borde de ingreso de caudal de Salto Grande, por lo que los resultados en puntos cercanos pueden verse afectados por la misma.

En la sección siguiente, presentada en la figura 6.2, donde existe una curva en planta del río entre la ciudad de Concordia y la de Yeruá, también se observan velocidades promedio relativamente altas, de hasta 1,50 m/s, asociadas a zonas de profundidad baja. En la sección desde Yeruá hasta Nueva Escocia, presentada en la figura 6.3, se observan velocidades promedio también altas, existiendo una contracción del flujo donde se tiene velocidades superiores a 1,50 m/s, aguas abajo de la cual las velocidades disminuyen.

Para la sección desde Nueva Escocia hasta la progresiva 280 km, figura 6.4, se tiene una primer zona de velocidades altas y profundidades bajas, y una segunda zona, donde las profundidades aumentan y se observa una disminución del valor de la velocidad promedio hasta 0,50 m/s. La siguiente sección, mostrada en la figura 6.5, presenta un comportamiento similar al de la zona de velocidades bajas de la sección anterior, con un leve incremento de la velocidad al ingresar en la curva en planta con dirección hacia el Oeste.

La sección mostrada en la figura 6.6, desde la progresiva 272 km hasta la 252 km, corresponde a una curva en planta del río, que presenta velocidades del orden de los 0,50 m/s en casi toda su longitud, con un incremento de la velocidad a la salida de la curva, con velocidades de 1,00 a 1,50 m/s, que luego vuelven a disminuir al ingresar a una zona de mayor profundidad. La sección siguiente, presentada en la figura 6.7, desde la progresiva 251 km hasta progresiva 236 km, presenta velocidades promedio del orden de los 0,50 m/s.

En la sección presentada en la figura 6.8 comienza el tramo del río Uruguay con mayor presencia de islas. Las velocidades sobre el brazo Oeste son mayores que las del brazo Este,

siendo las del primero del orden de los 0,70 a 0,80 m/s, mientras que las del segundo, por el cual discurre menos caudal, son del orden de los 0,40 a 0,60 m/s. Sobre la isla se puede ver que las velocidades son menores a los 0,10 m/s, presentando una dirección general con sentido aguas abajo, pero teniendo en algunos puntos, principalmente sobre los bordes de la isla, direcciones promedio transversales a esta, lo cual se puede atribuir a que el secado y mojado de las celdas de la isla genera velocidades transversales a la dirección del flujo. El mismo fenómeno ocurre en las márgenes del río, y se observa a lo largo de todo el dominio de cálculo.

En la figura 6.9 se presenta la sección del río que discurre entre la ciudad de Colón, Argentina, y Paysandú, Uruguay. Esta sección presenta varias islas así como contracciones en planta, que llevan a observar velocidades promedio del orden de 1,00 m/s inclusive. En la sección siguiente, mostrada en la figura 6.10, se encuentran las islas Almirón y Almería, que generan una contracción de la sección, con un aumento de la velocidad de flujo en la zona Norte, a la entrada del brazo Oeste, con valores promedio de entre 1,00 a 1,50 m/s, mientras que en el resto de la sección los valores son del orden de 0,60 a 0,80 m/s.

La sección mostrada en la figura 6.11, que va desde la ciudad de Concepción del Uruguay, Argentina, hasta la progresiva 171 km, marca el comienzo del tramo de mayor complejidad geométrica del río Uruguay, en términos de la cantidad de islas y brazos presentes en el mismo. Según se puede ver en el campo medio de velocidades, la mayoría del flujo discurre por el brazo Este, con velocidades de hasta 1,00 m/s en algunos puntos. Como se mencionara en la sección 4.2, esta zona de islas es la que cuenta con la menor densidad de datos de batimetría, únicamente los de la Serie 800 del Atlas Cartográfico del Río Uruguay (SOHMA, 2013b). El brazo Oeste por su parte, no se encuentra relevado, siendo su batimetría aproximada en base a las de brazos sí relevados de condiciones similares. En este brazo se observan velocidades menores, del orden de 0,50 m/s. En las islas se observan velocidades inferiores a los 0,10 m/s, con direcciones promedio que pueden ser transversales a las direcciones de flujo sobre el canal.

La siguiente sección, presentada en la figura 6.12, muestra un comportamiento similar a la anterior, donde las mayores velocidades ocurren en el brazo Este, por donde circula más caudal, con valores de hasta 1,50 m/s, mientras que el brazo Oeste presenta velocidades del orden de 0,40 m/s, con valores un poco mayores en zonas con contracción de la sección. Sobre el brazo Este, aguas abajo de la localidad de San Javier, Uruguay, se observa una zona de recirculación en la margen derecha, con velocidades del orden de 0,40 m/s. Sobre las islas se observan, al igual que en las secciones anteriores, velocidades del orden de los 0,10 m/s con una dirección general que acompaña el flujo por los canales, pero que puede presentar una orientación casi perpendicular al cauce. La sección a continuación de ésta, mostrada en la figura 6.13 presenta un comportamiento muy similar en términos del orden de las velocidad y el flujo por cada brazo del río.

En la secciones mostradas en las figuras 6.14, 6.15 y 6.16, el río se separa en 5 brazos, para

luego confluir en dos alrededor de la isla Caballos. Los brazos centrales son los que presentan mayores velocidades de flujo, de hasta 0,90 m/s, mientras que los brazos secundarios tienen velocidades promedio menores, del orden de los 0,50 m/s. En la margen Este del brazo Este, al ingreso en la sección (figura 6.14) se observa una zona de recirculación, con velocidades del orden de 0,10 m/s. Luego de la confluencia en dos brazos, alrededor de la isla Caballos (figura 6.16), se observa que las velocidades en ambos brazos del río son menores, del orden de los 0,30 a 0,40 m/s, con una tendencia de que el flujo entre los brazos sea desde la margen argentina hacia la uruguaya.

En la figura 6.17 el río vuelve a confluir a un cauce único, a la altura del puente General San Martín, Aguas arriba de la ciudad de Fray Bentos. En esta sección se observan algunas zonas de recirculación con velocidades bajas sobre las bahías en la margen uruguaya, como por ejemplo al Norte y Oeste de la ciudad de Fray Bentos. Las velocidades promedio en esta sección alcanzan valores máximos del orden de los 0,70 m/s.

En la figura 6.18 se muestra la bahía donde desemboca el río Gualeguaychú así como la transición entre los Tramos 2 y 3 del río Uruguay, donde pasa de fluir de Este a Oeste, a hacerlo de Norte a Sur aproximadamente. Con el cambio de dirección y ensanchamiento del cauce se puede apreciar una disminución relevante de la velocidad promedio, que pasa a ser del orden de 0,20 a 0,30 m/s como máximo. En la bahía donde desemboca el Gualeguaychú, se observa un sentido de circulación general antihorario, con velocidades bajas, inferiores a los 0,10 m/s.

En la sección siguiente, mostrada en la figura 6.19, el cauce aumenta su ancho a un valor de 7 km aproximadamente, con velocidades máximas del orden de 0,30 m/s, las cuales se dan sobre las zonas más profundas del canal principal. En la sección a continuación de ésta, mostrada en la figura 6.20, se observa un comportamiento similar, con velocidades del mismo orden, que expresan sus mayores valores sobre el canal principal.

En la sección presentada en la figura 6.21, se encuentra la desembocadura del río Negro, la cual es una condición de contorno en caudales con valores relevantes a los efectos de la hidrodinámica. En esta sección se observa un campo de velocidades bastante uniforme con valores en su mayoría entre los 0,10 y 0,20 m/s, presentando valores de hasta 0,30 m/s sobre el las zonas más profundas del cauce. La sección siguiente, que puede verse en la figura 6.22, tiene un comportamiento similar a ésta, con velocidades en promedio menores, pero que aumentan hacia la zona de contracción del cauce sobre punta de Chaparro, donde el río presenta profundidades de unos 20 m y la velocidad aumenta a valores del orden de los 0,40 m/s.

La última sección, mostrada en la figura 6.23, corresponde a los alrededores de Nueva Palmira, donde se tiene la condición de borde de nivel impuesto en la frontera Sur del dominio de cálculo, así como una condición de ingreso de caudal por el río Paraná Bravo. En función de la cercanía a las condiciones de contorno, y la forma en que estas fueron impuestas, los

valores del campo de velocidad promedio en esta zona no son representativos de la realidad. Por ejemplo, la condición de caudal que ingresa por el Paraná Bravo no permite la inversión del flujo de este río, haciendo que el valor de la velocidad sea siempre saliente a la desembocadura, lo cual podría no ser de esta forma si se incluyera en la modelación un tramo más extenso del río Paraná, con lo cual podrían aparecer patrones de flujo medio distintos a los observados en la figura.

Para lograr una visión más global, de la figura 6.24 a la 6.27, se presenta el módulo de la velocidad promedio en cada tramo del modelo. En la figura 6.24 se muestra el Tramo 1, el cual presenta los módulos de velocidad más elevados, de entre 1,00 a 1,50 m/s en su parte Norte, con una disminución abrupta en el tramo recto central, causado por un ensanchamiento del canal y aumento de las profundidades. En la figura 6.25 se presenta la zona Norte del Tramo 2, donde se puede ver que las velocidades en términos generales son un poco menores a las del Tramo 1, estando en esta zona del Tramo 2 más cerca de los 0,50 m/s, con valores mayores en las contracciones del cauce. En la figura 6.26 se presenta la zona Sur del Tramo 2, con mayor presencia de islas y geometría en planta más compleja, donde las velocidades vuelven a incrementar a valores del orden de 1,00 a 1,50 m/s, con una concentración del flujo por el brazo Este del río, para luego disminuir más al Sur, donde el río se divide en 5 brazos, a valores más cercanos a 0,50 m/s. En el Tramo 3, mostrado en la figura 6.27, se puede ver que las velocidades promedio disminuyen sustancialmente respecto a los tramos anteriores, con valores de entre 0,10 m/s a 0,40 m/s sobre el cauce principal, donde se tienen las mayores profundidades. En la parte final de este tramo se produce una contracción del cauce en planta, con una aumento de las velocidades.

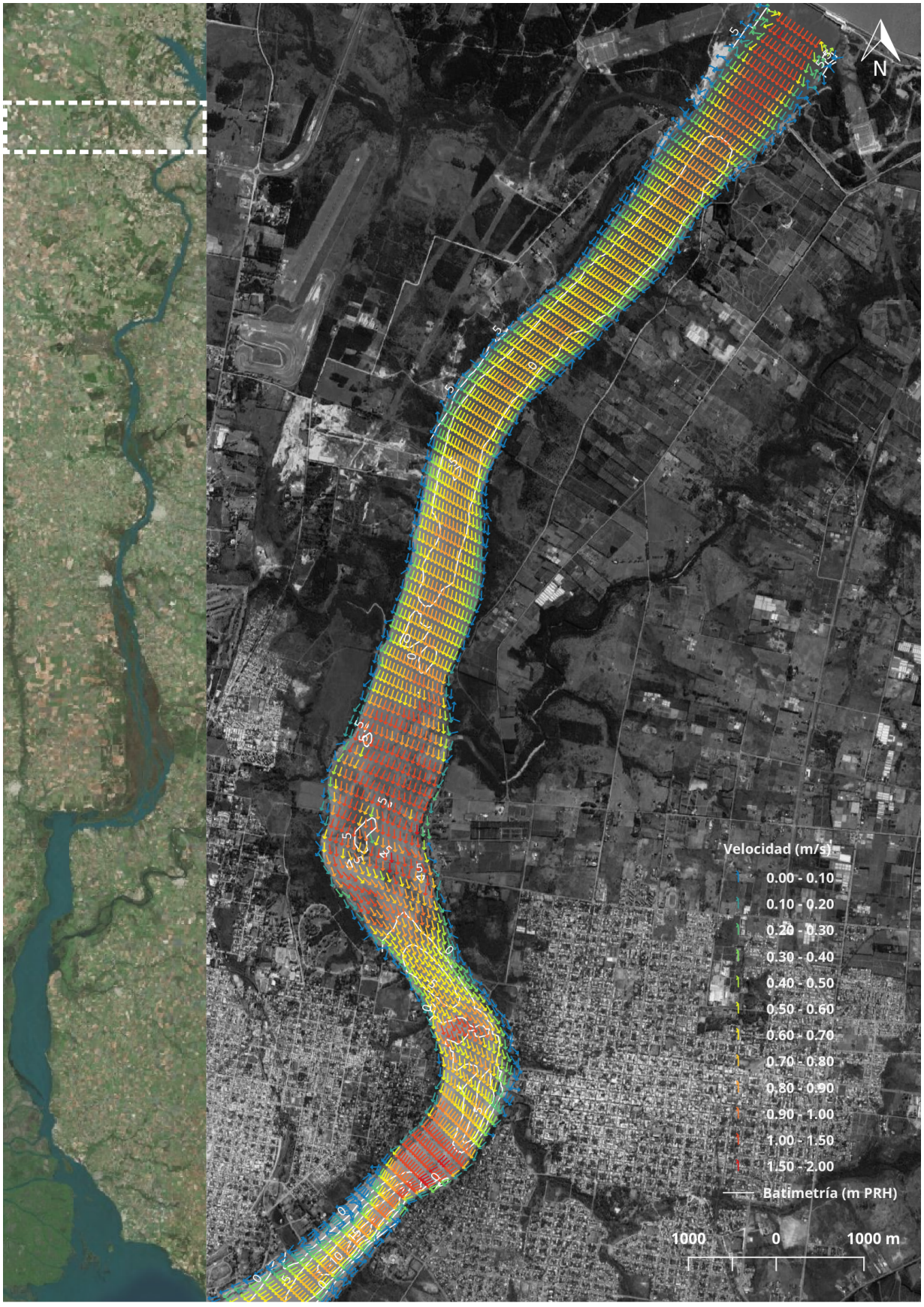


Figura 6.1: Campo de velocidad promedio,desde progresiva 350 km hasta progresiva 333 km.

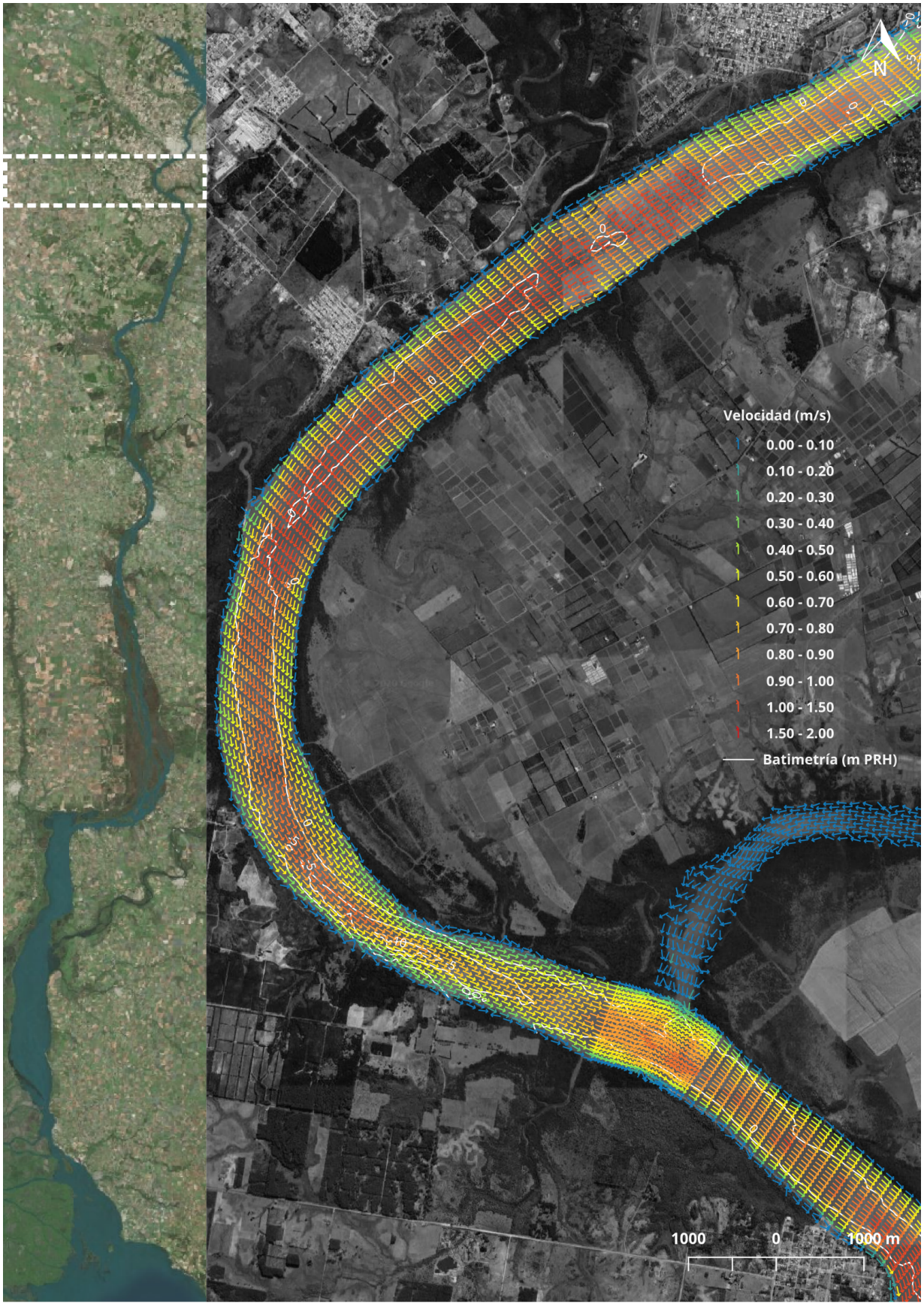


Figura 6.2: Campo de velocidad promedio, desde progresiva 332 km hasta progresiva 312 km.

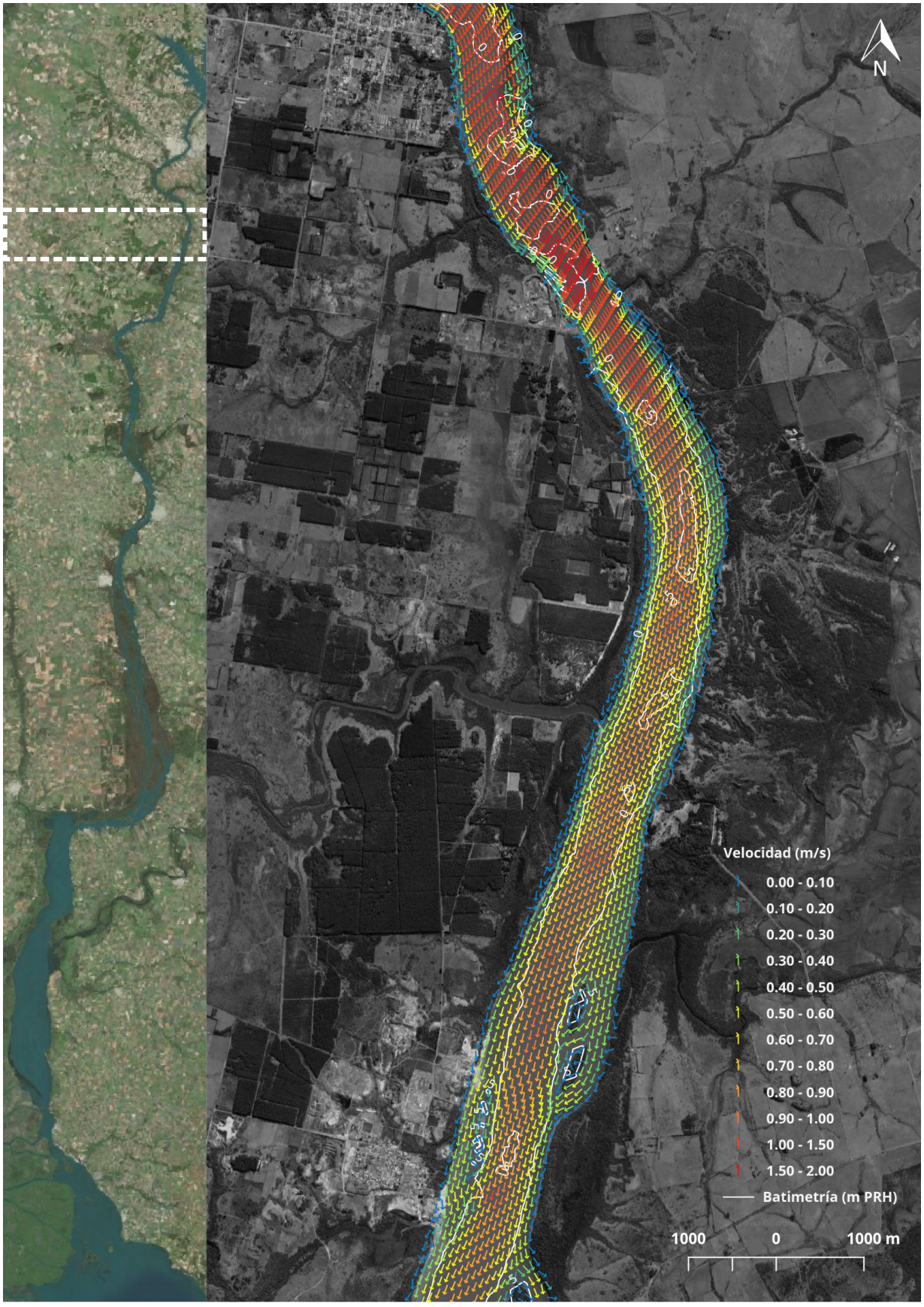


Figura 6.3: Campo de velocidad promedio, desde progresiva 311 km hasta progresiva 296 km.

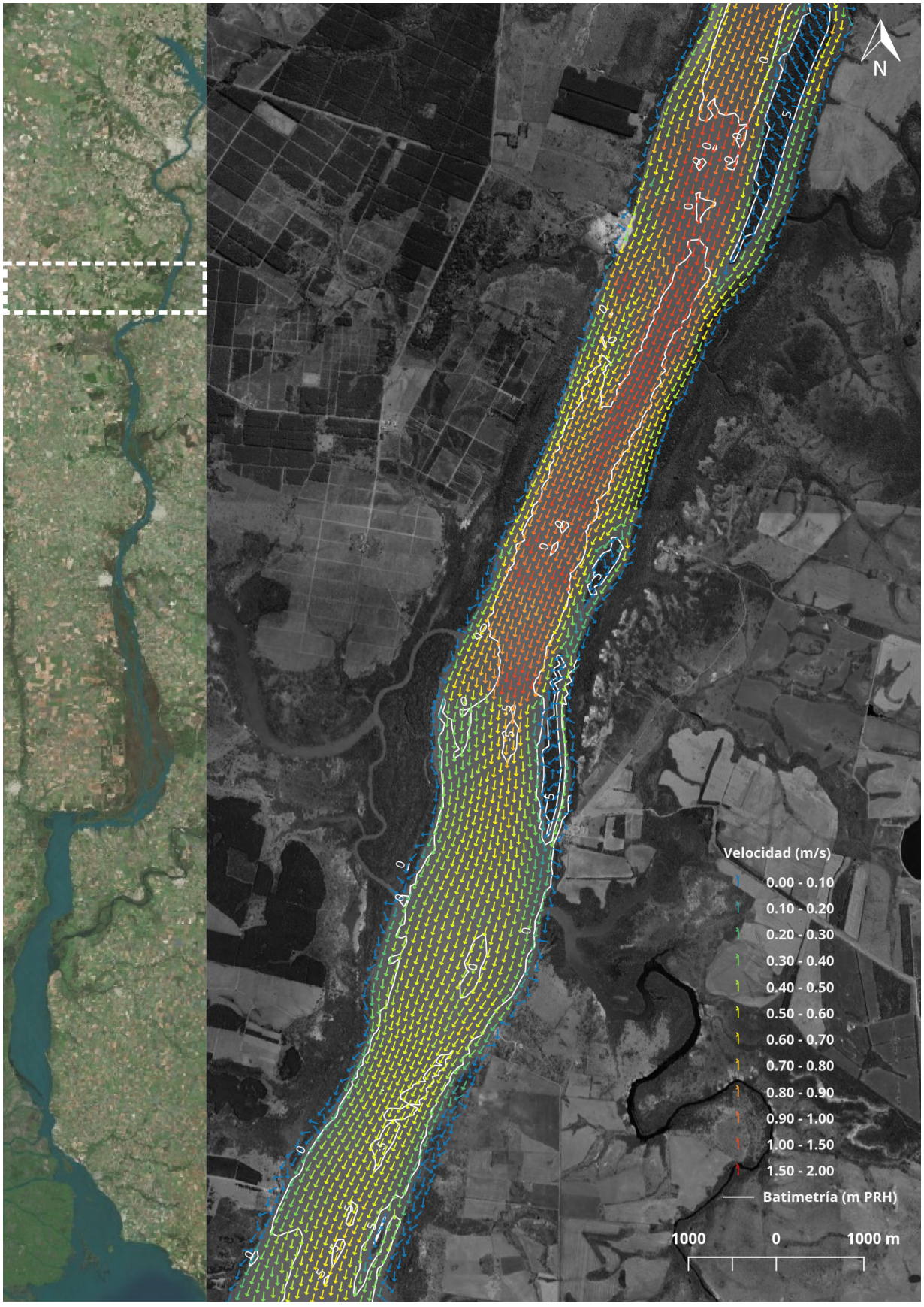


Figura 6.4: Campo de velocidad promedio, desde progresiva 295 km hasta progresiva 280 km.

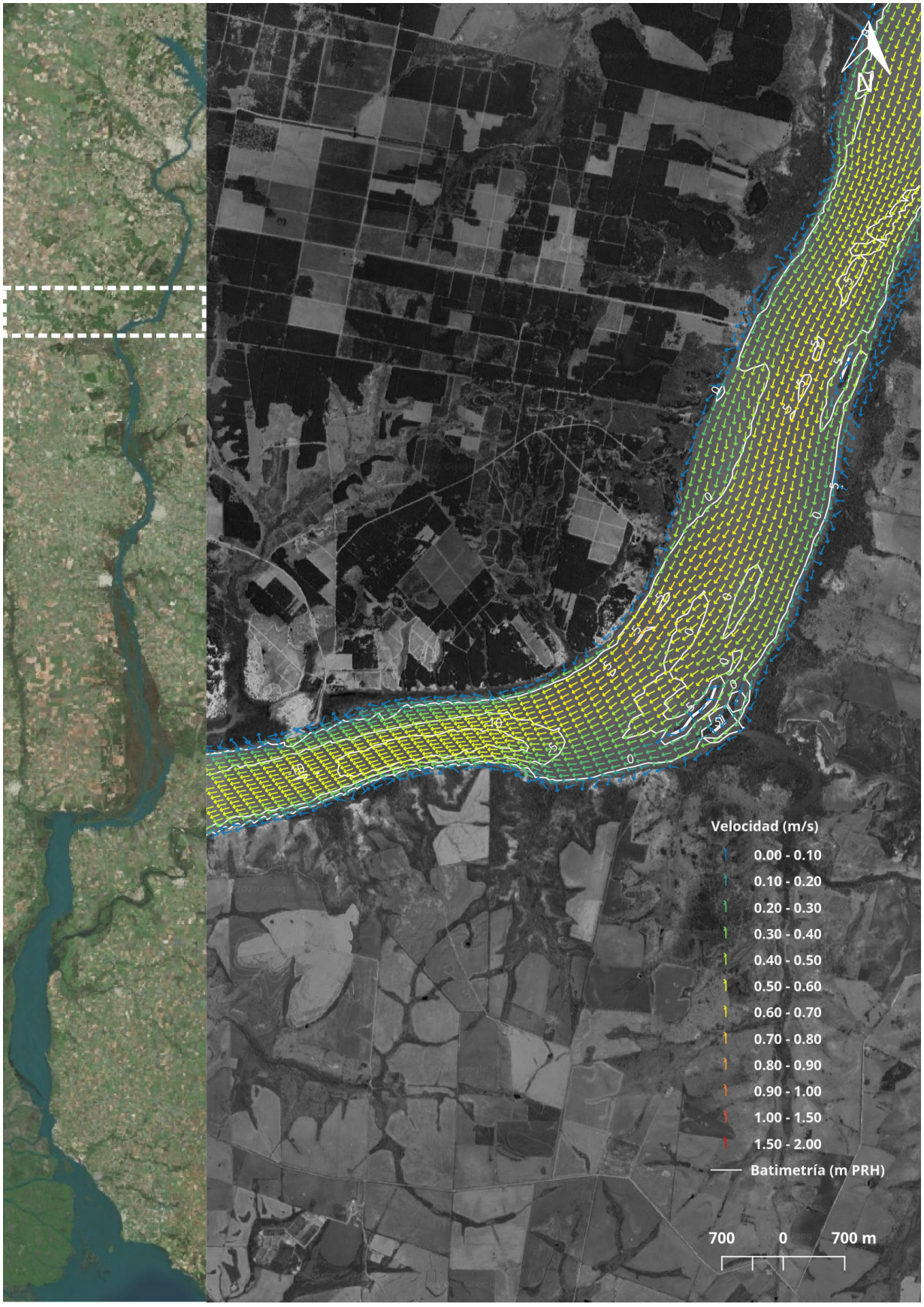


Figura 6.5: Campo de velocidad promedio, desde progresiva 282 km hasta progresiva 271 km.

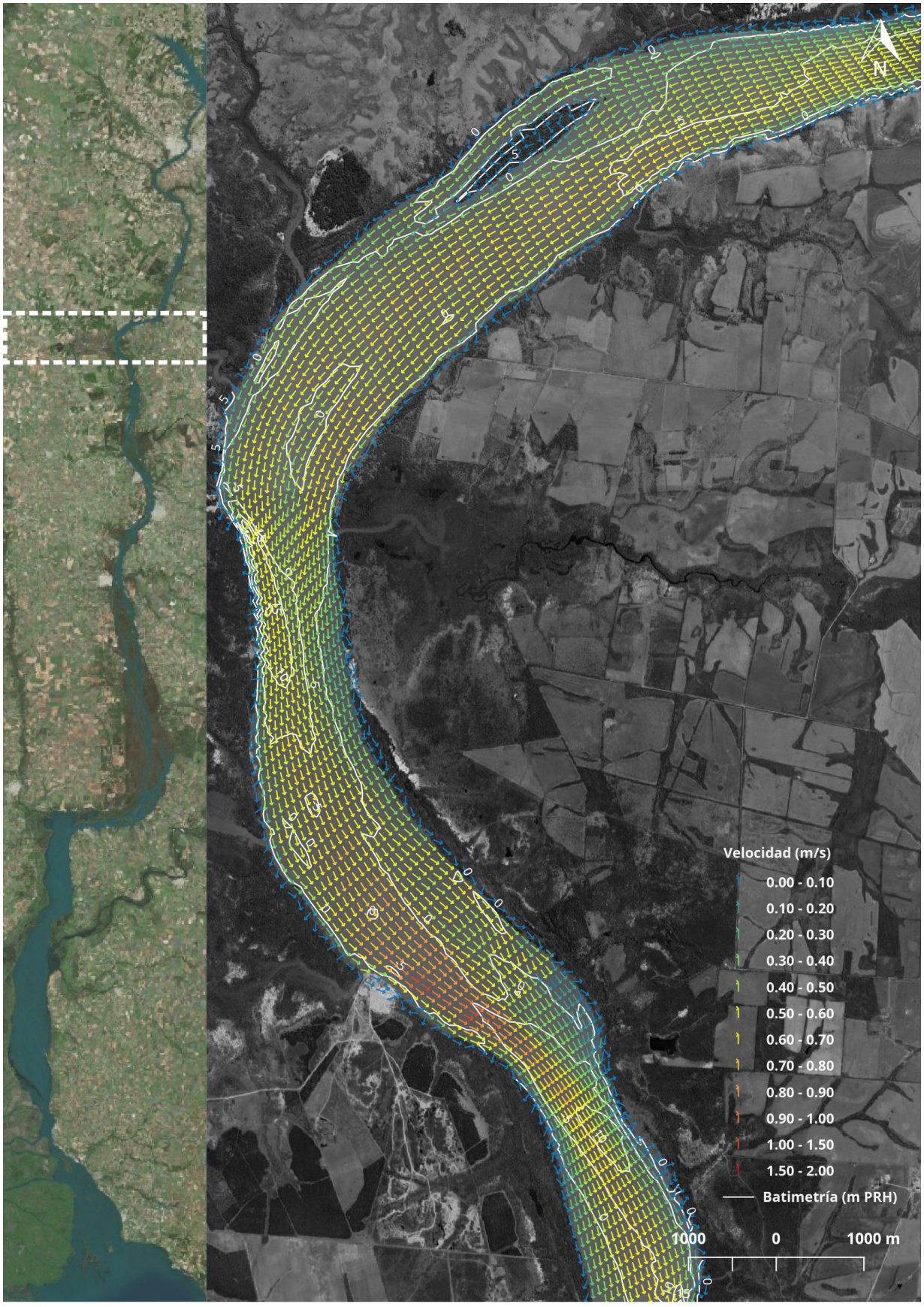


Figura 6.6: Campo de velocidad promedio, desde progresiva 272 km hasta progresiva 252 km.

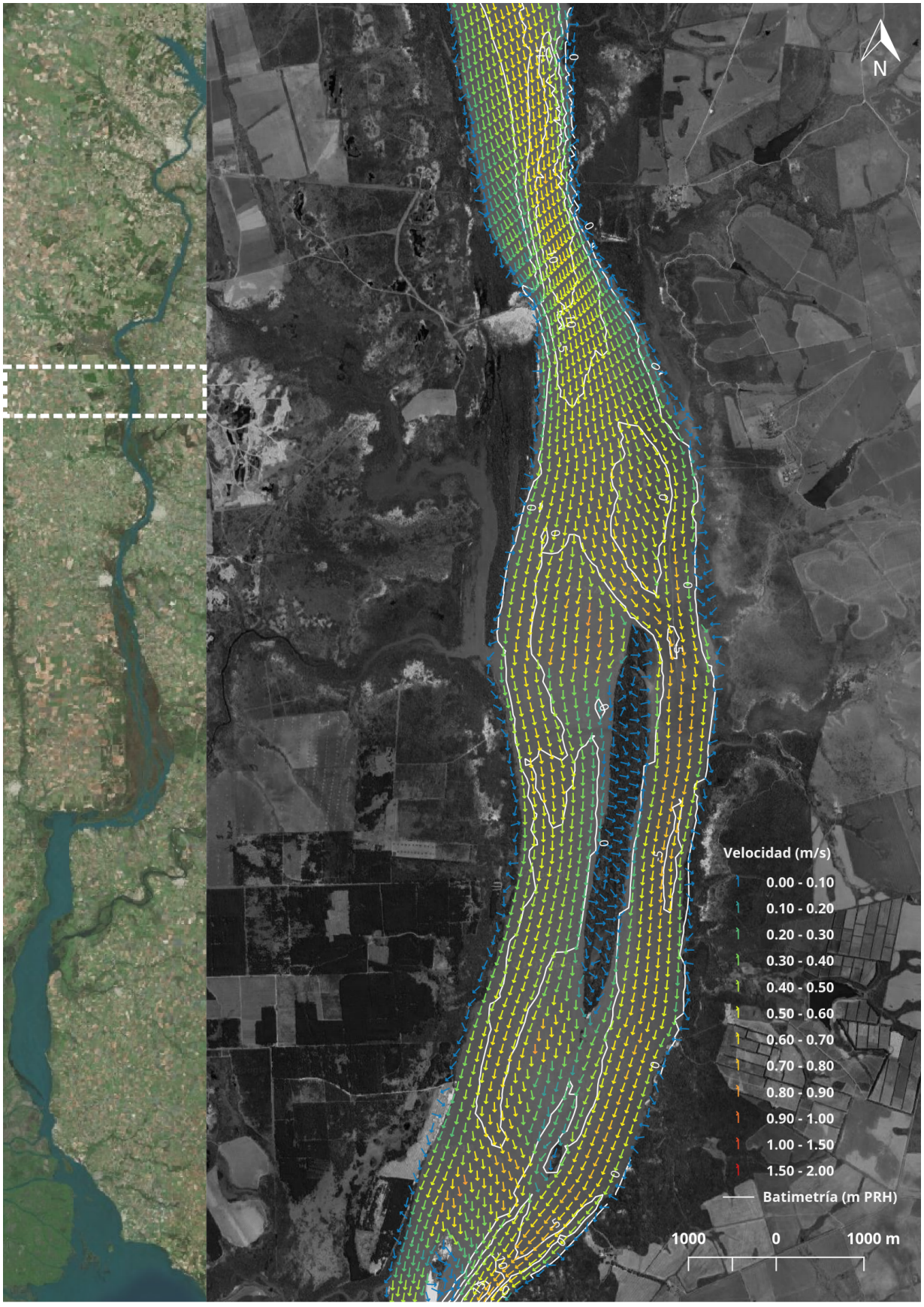


Figura 6.7: Campo de velocidad promedio, desde progresiva 251 km hasta progresiva 236 km.

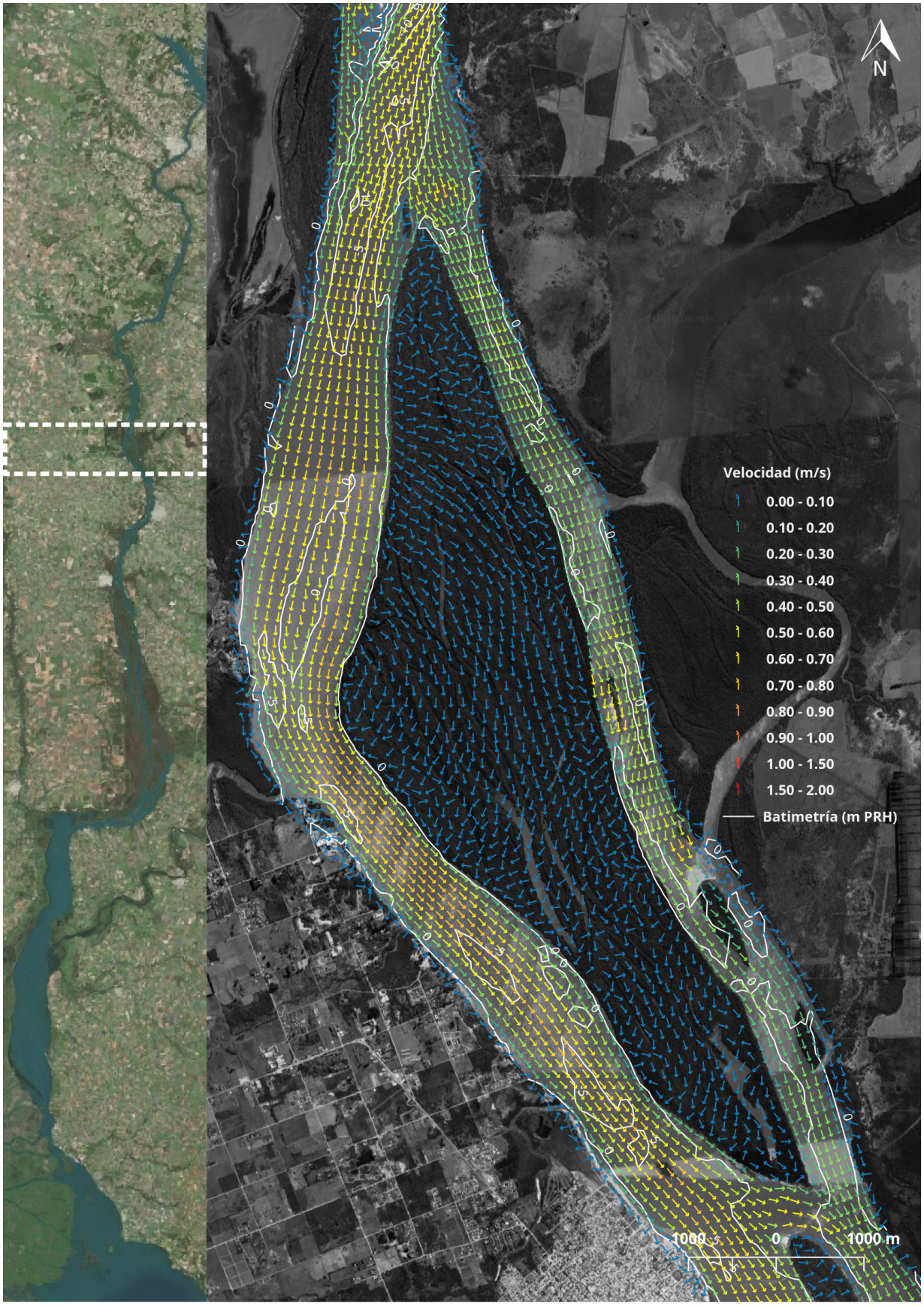


Figura 6.8: Campo de velocidad promedio, desde progresiva 235 km hasta progresiva 219 km.

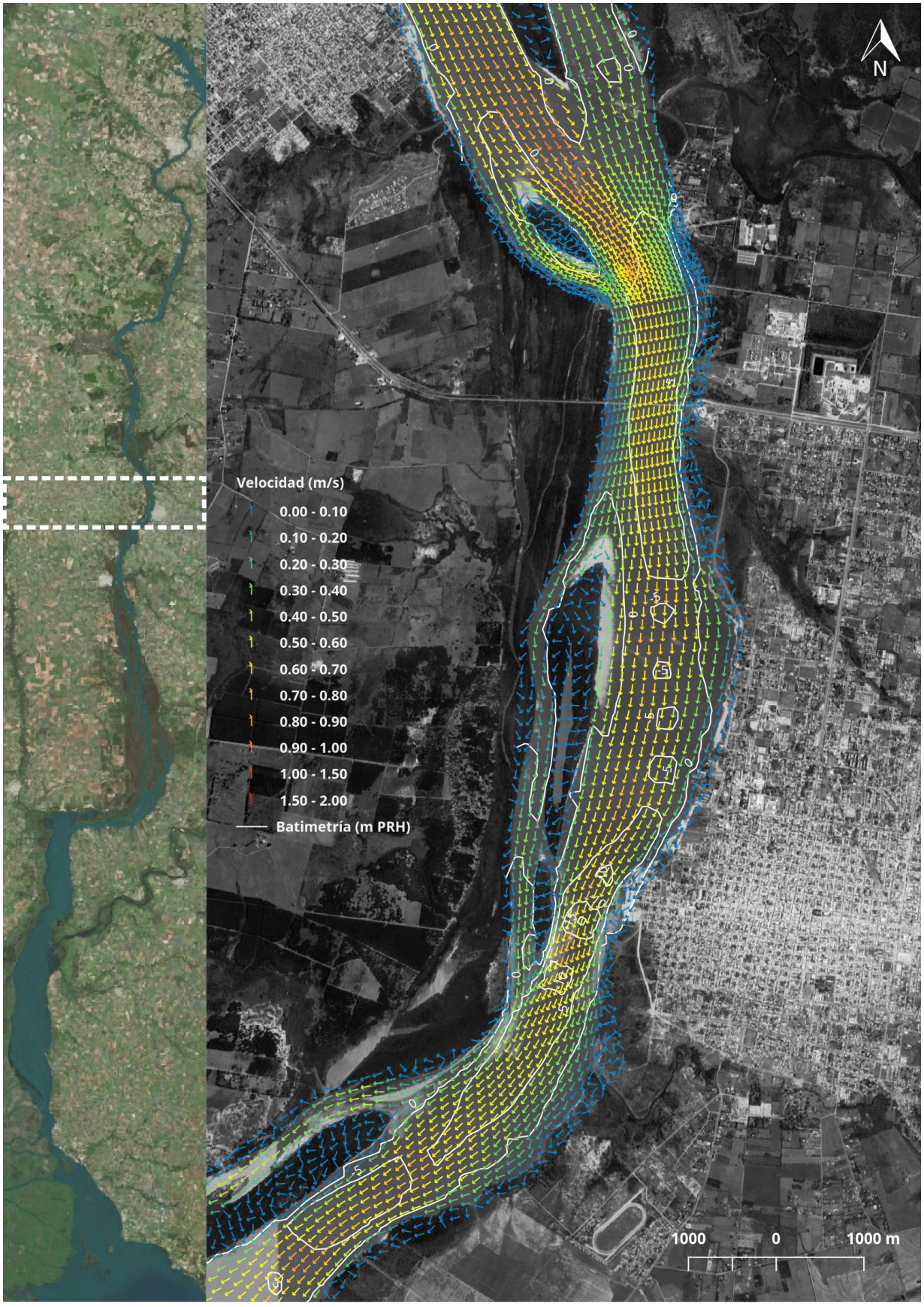


Figura 6.9: Campo de velocidad promedio, desde progresiva 218 km hasta progresiva 201 km.

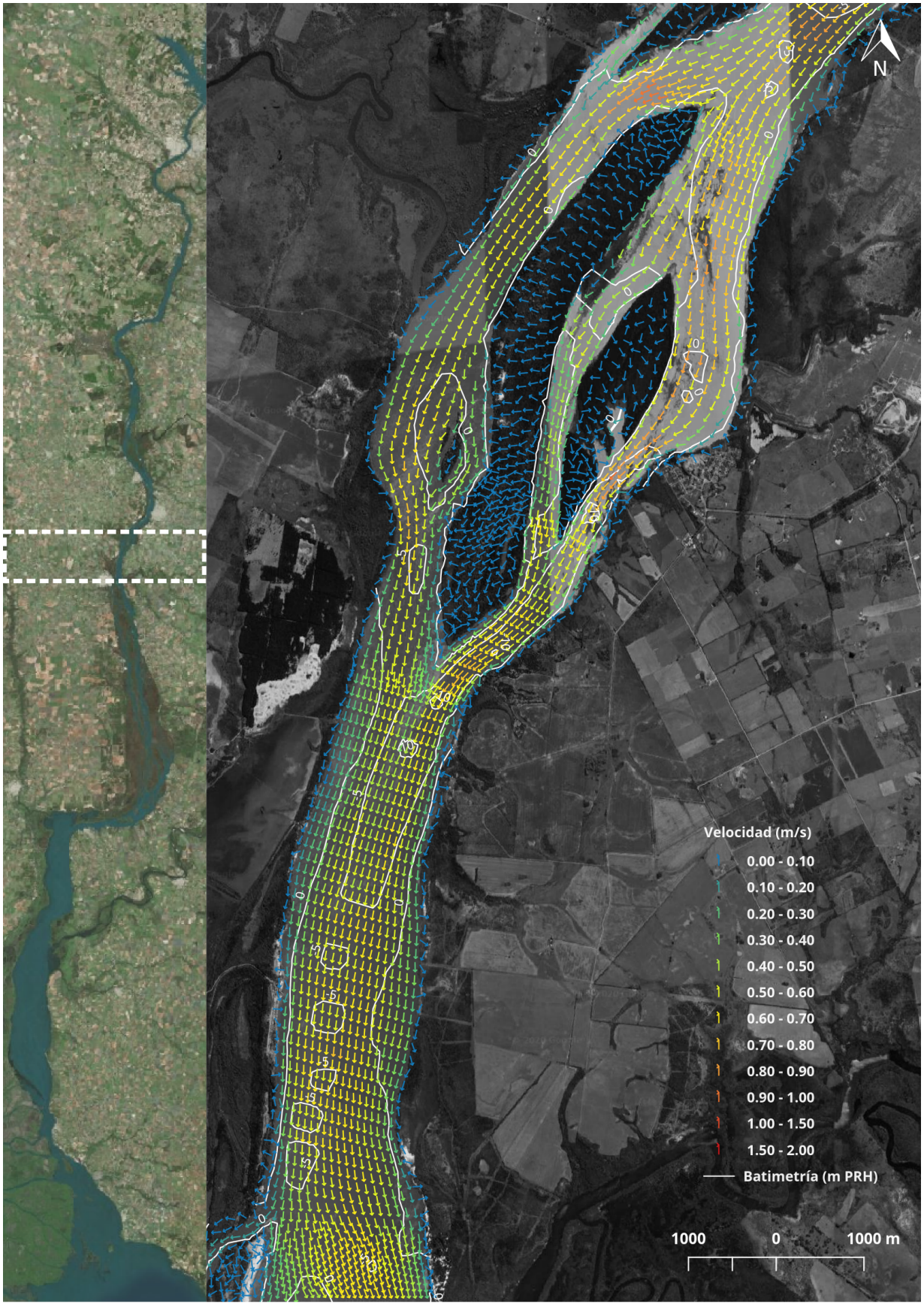


Figura 6.10: Campo de velocidad promedio, desde progresiva 202 km hasta progresiva 185 km.

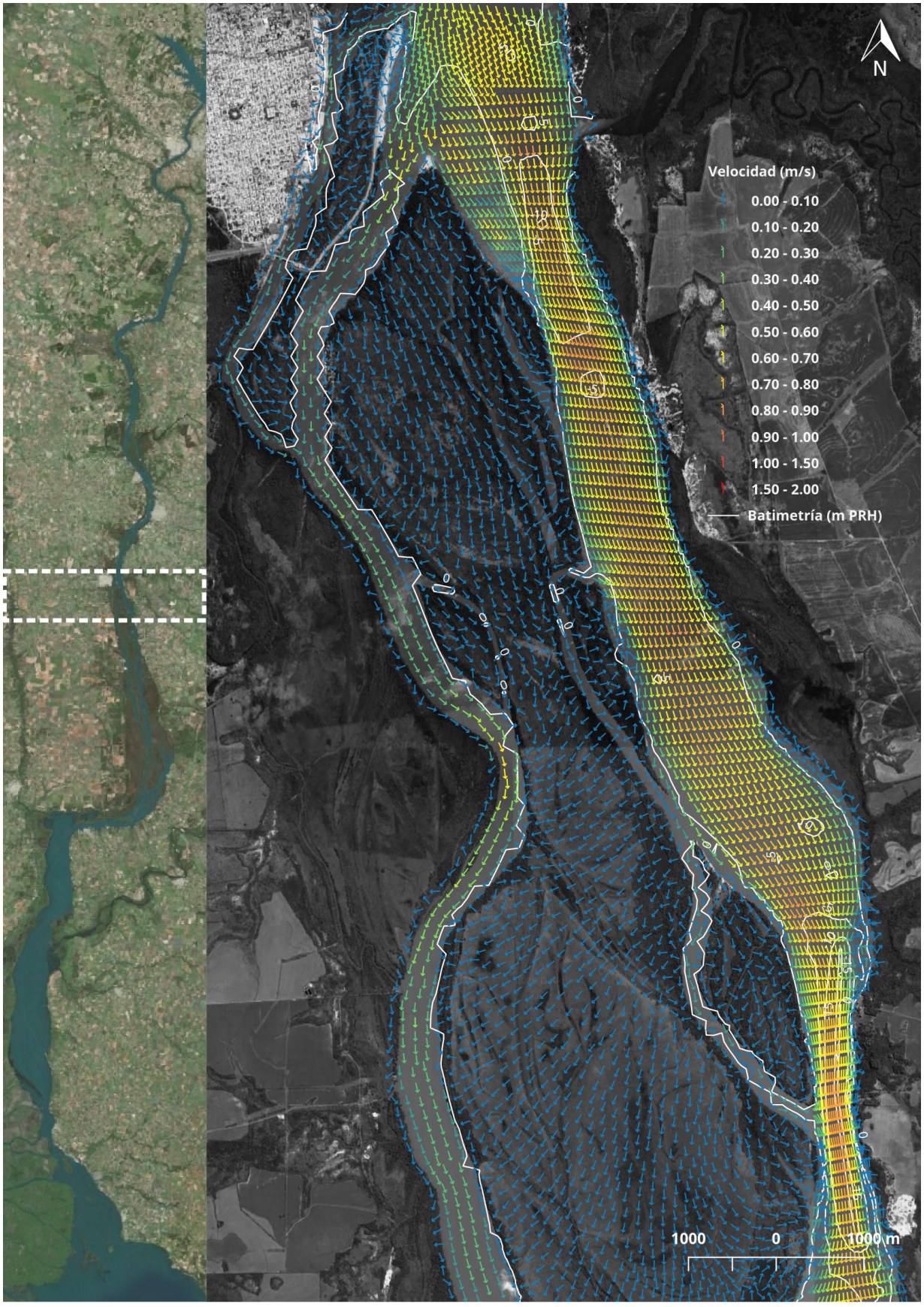


Figura 6.11: Campo de velocidad promedio, desde progresiva 186 km hasta progresiva 171 km.

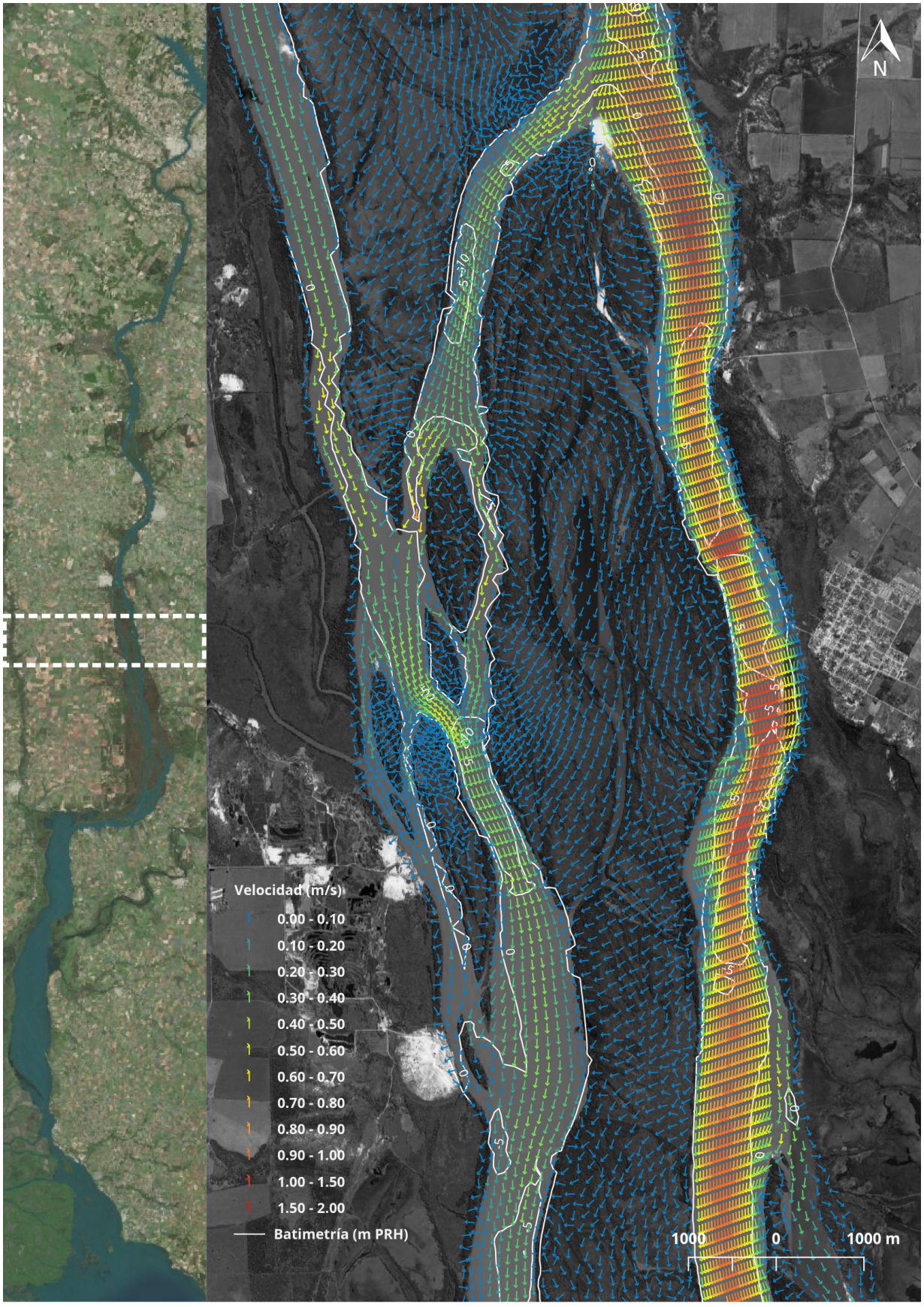


Figura 6.12: Campo de velocidad promedio, desde progresiva 170 km hasta progresiva 156 km.

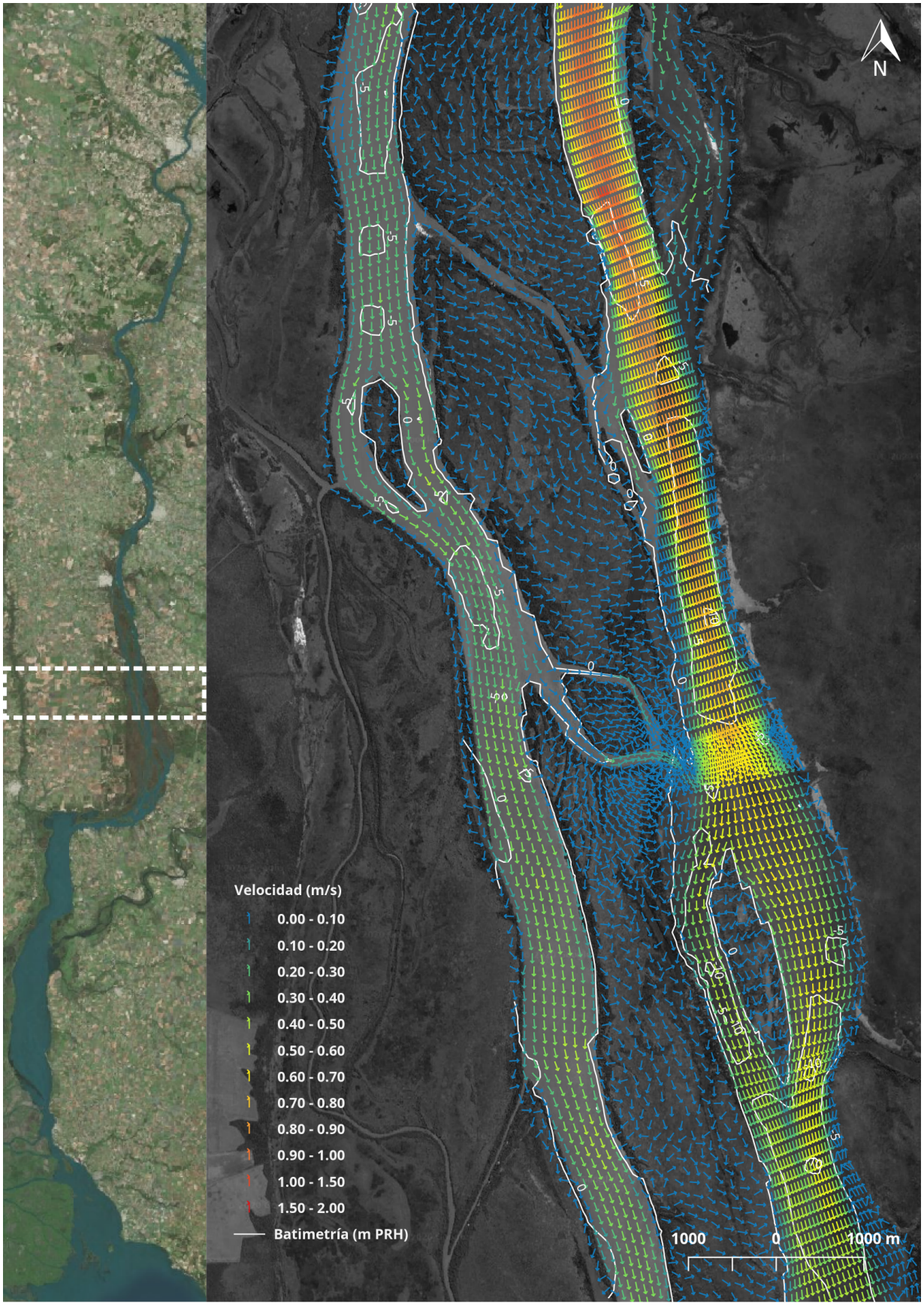


Figura 6.13: Campo de velocidad promedio, desde progresiva 157 km hasta progresiva 143 km.

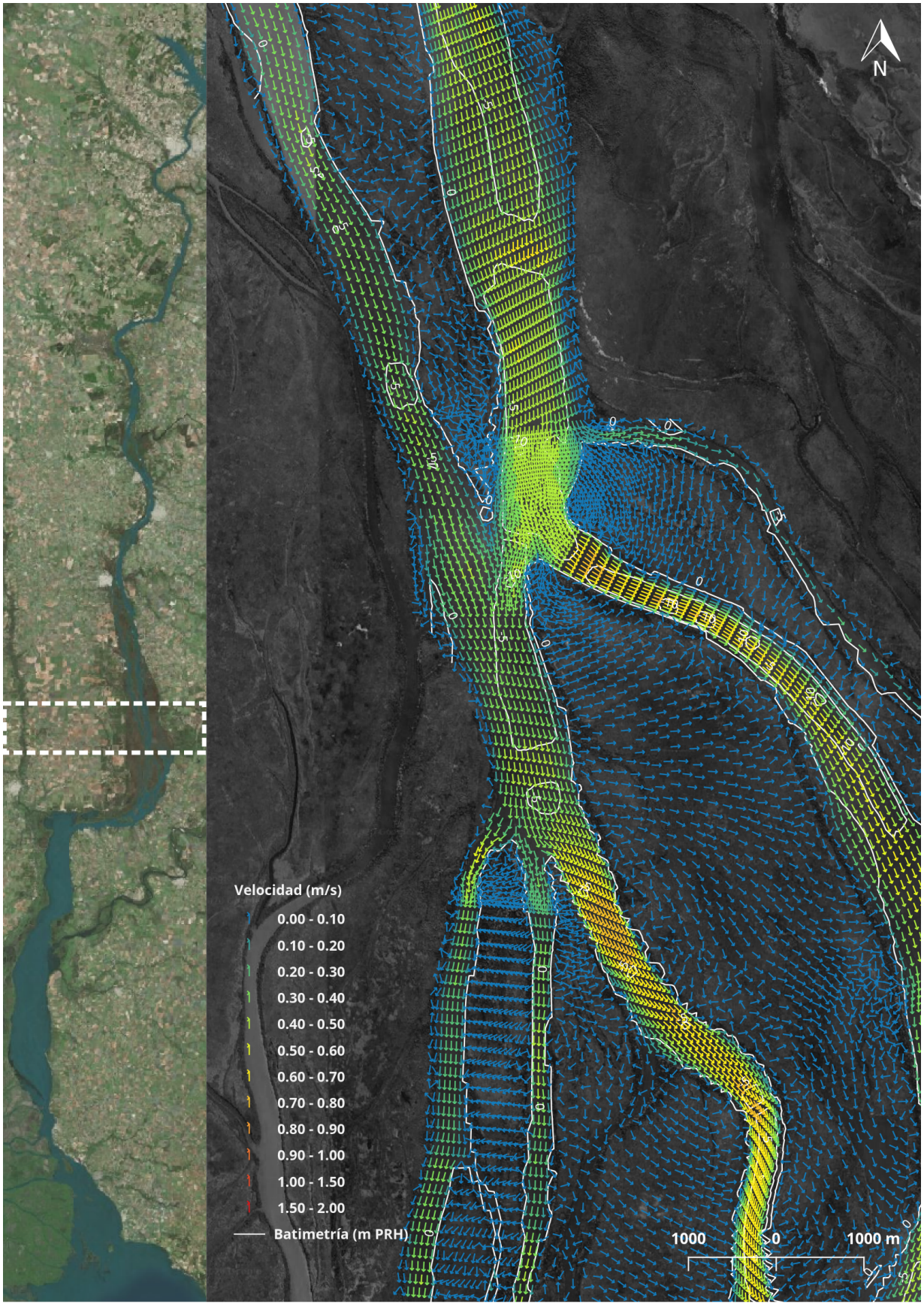


Figura 6.14: Campo de velocidad promedio, desde progresiva 143 km hasta progresiva 128 km.

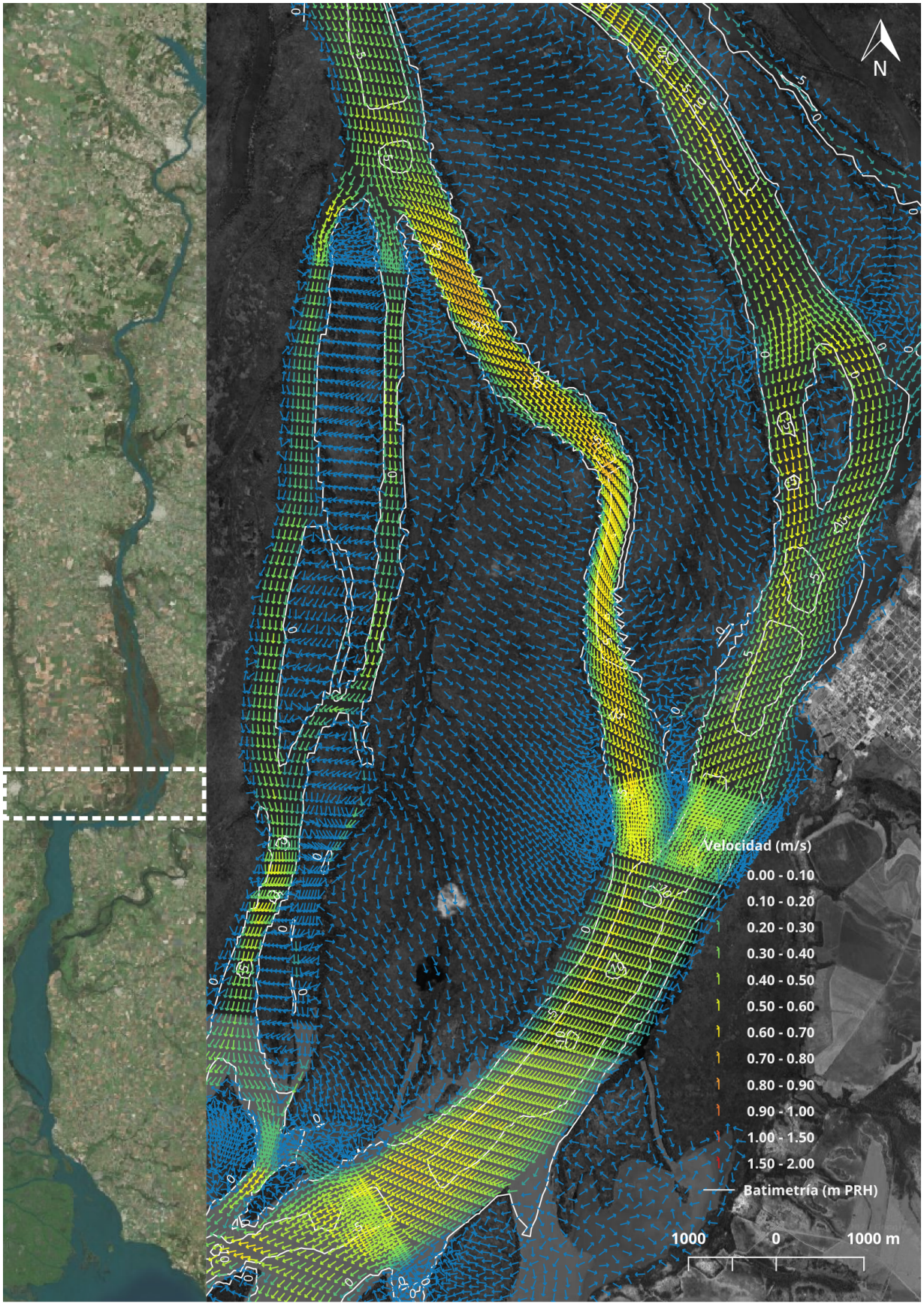


Figura 6.15: Campo de velocidad promedio, desde progresiva 135 km hasta progresiva 119 km.

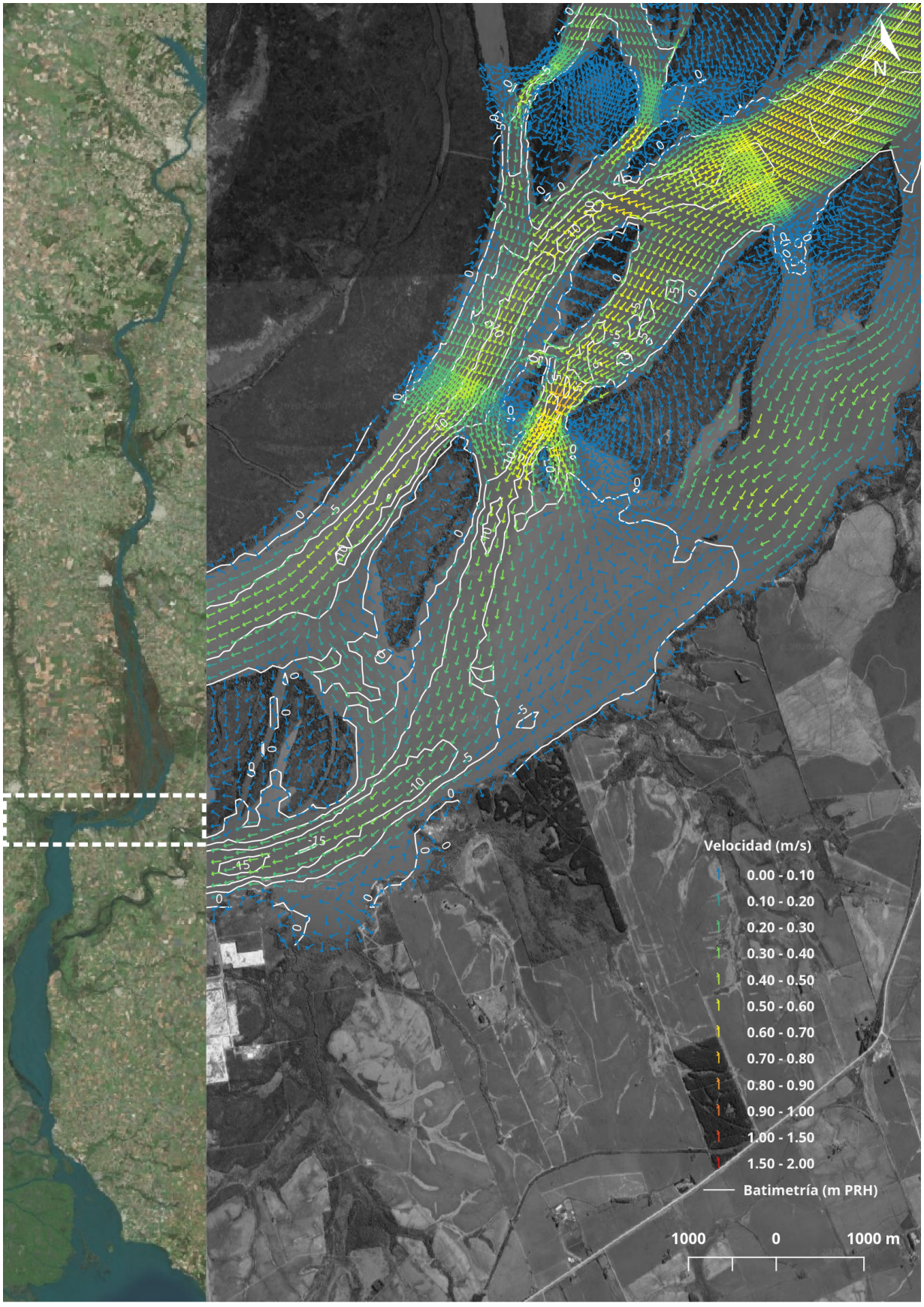


Figura 6.16: Campo de velocidad promedio, desde progresiva 122 km hasta progresiva 112 km.

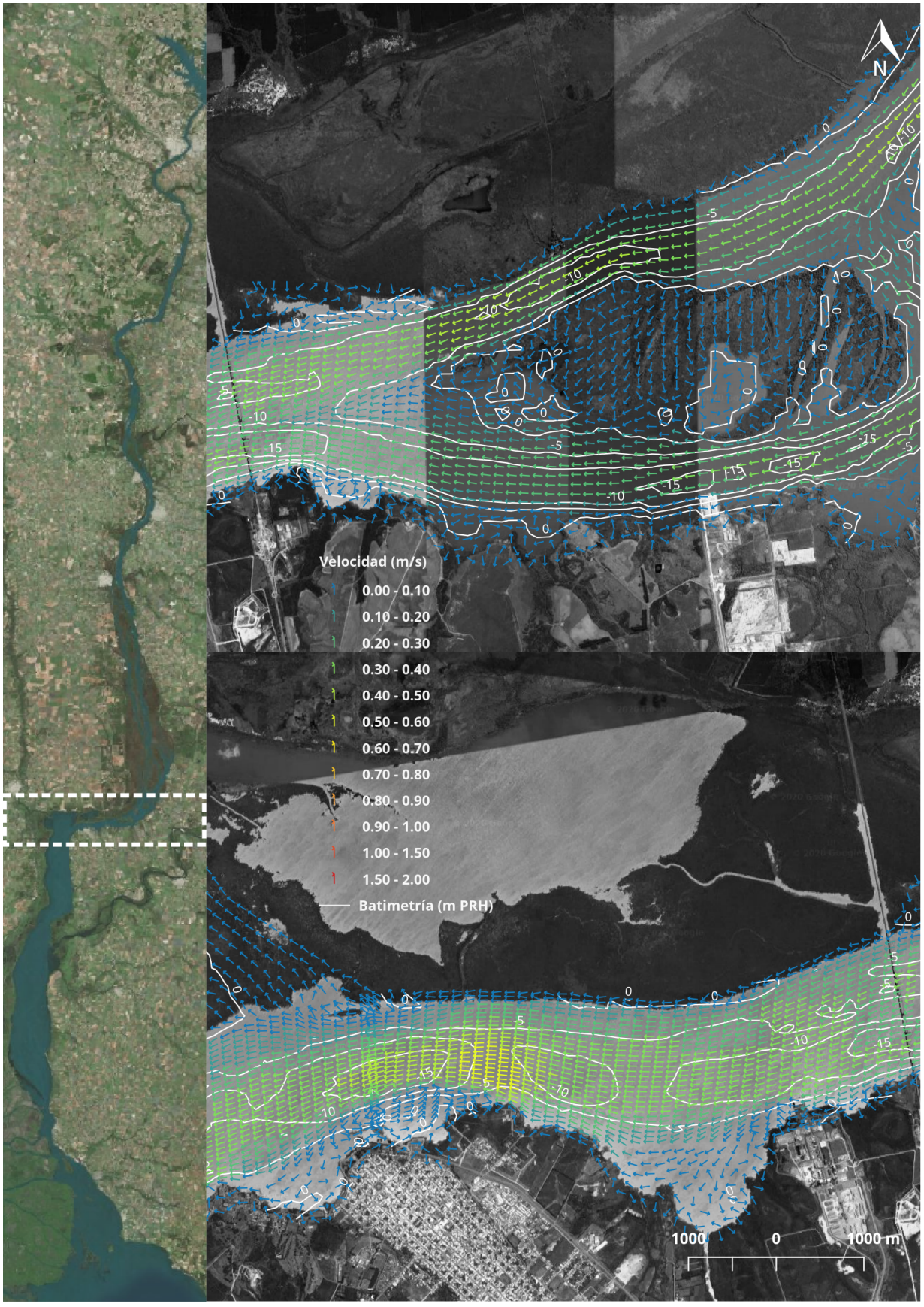


Figura 6.17: Campo de velocidad promedio, desde progresiva 113 km hasta progresiva 105 km (arriba), y desde progresiva 105 km hasta progresiva 97 km (abajo).

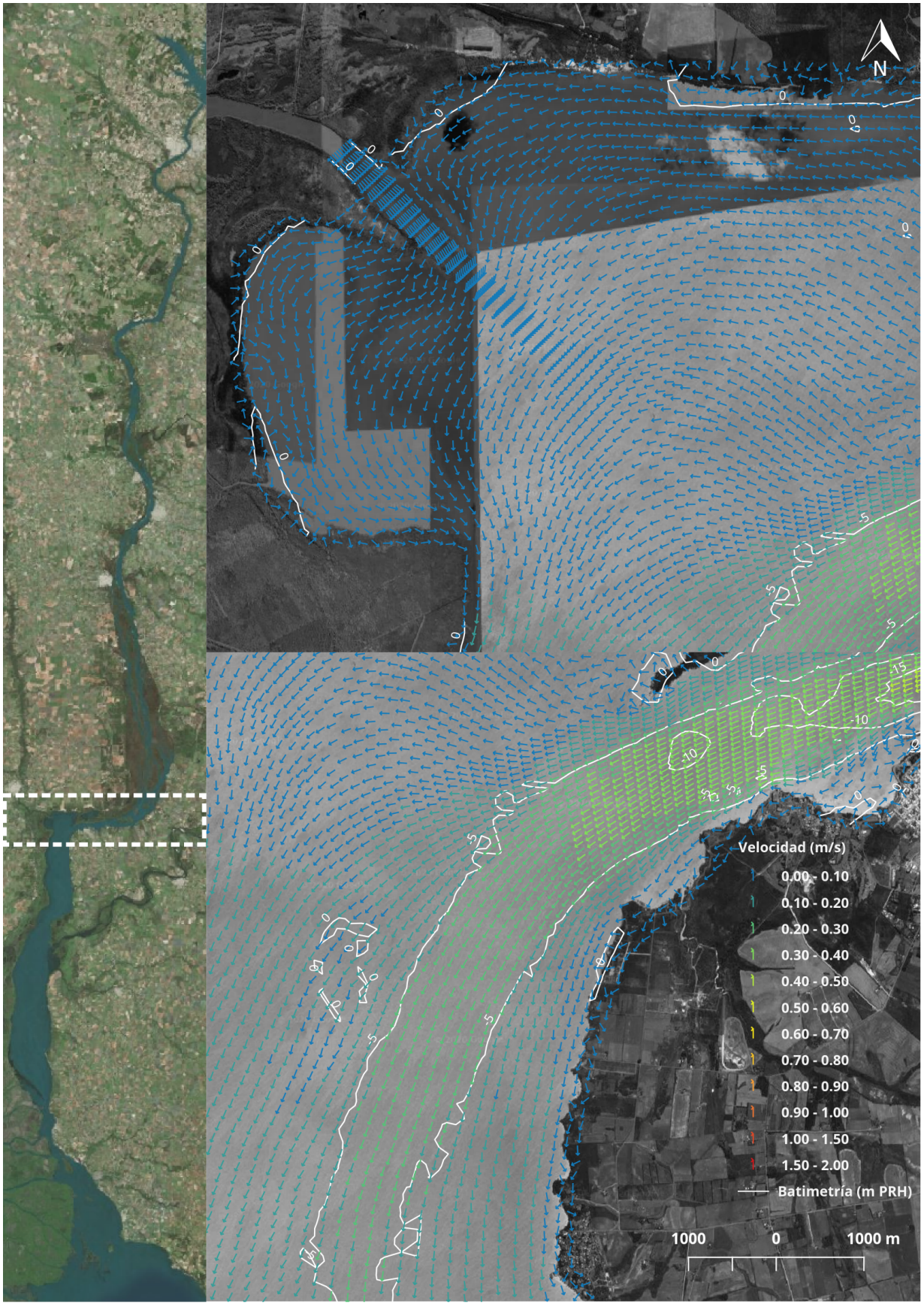


Figura 6.18: Campo de velocidad promedio, sobre desembocadura del Gualeguaychú (arriba), y desde progresiva 99 km hasta progresiva 88 km (abajo).

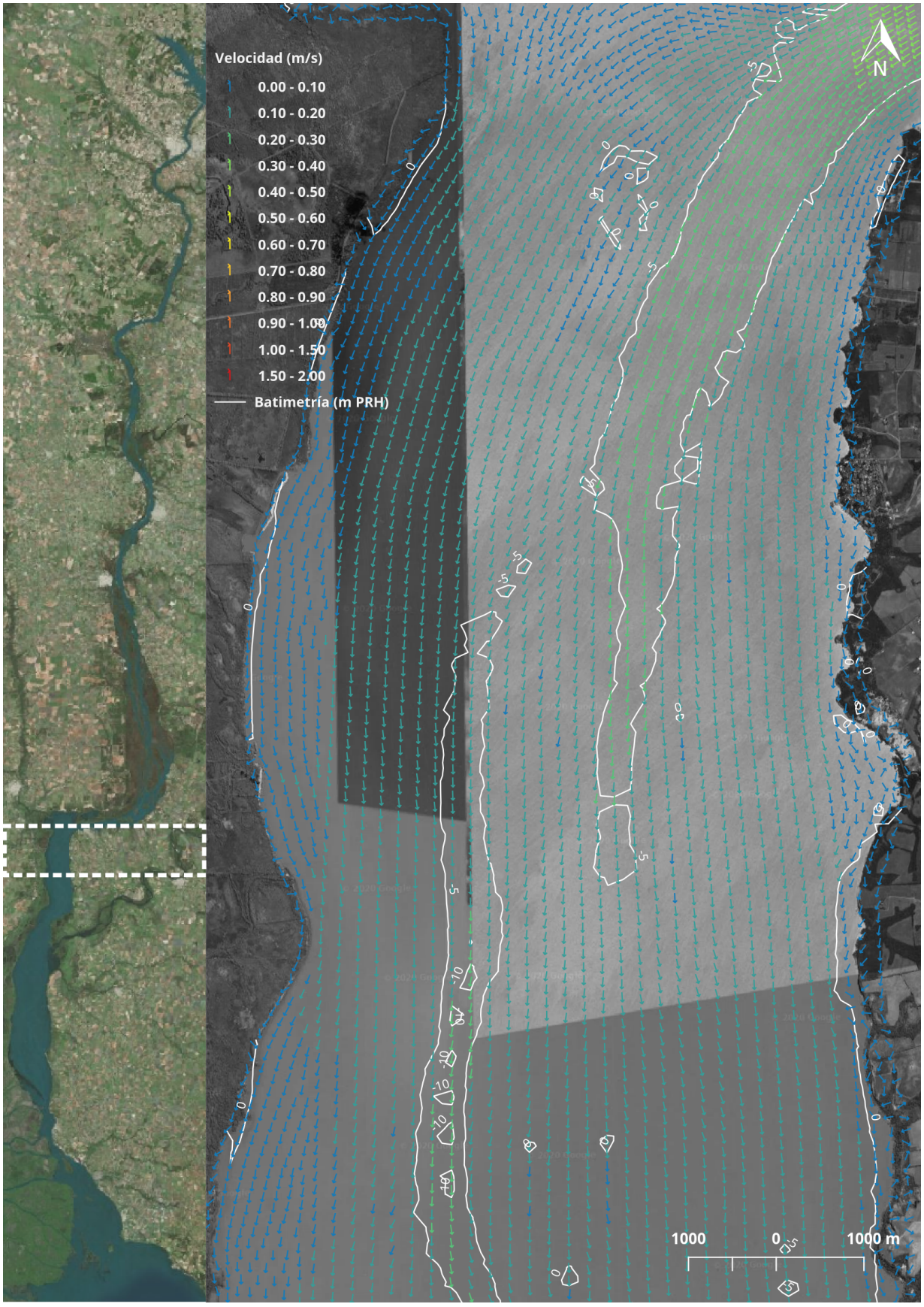


Figura 6.19: Campo de velocidad promedio, desde progresiva 95 km hasta progresiva 79 km.

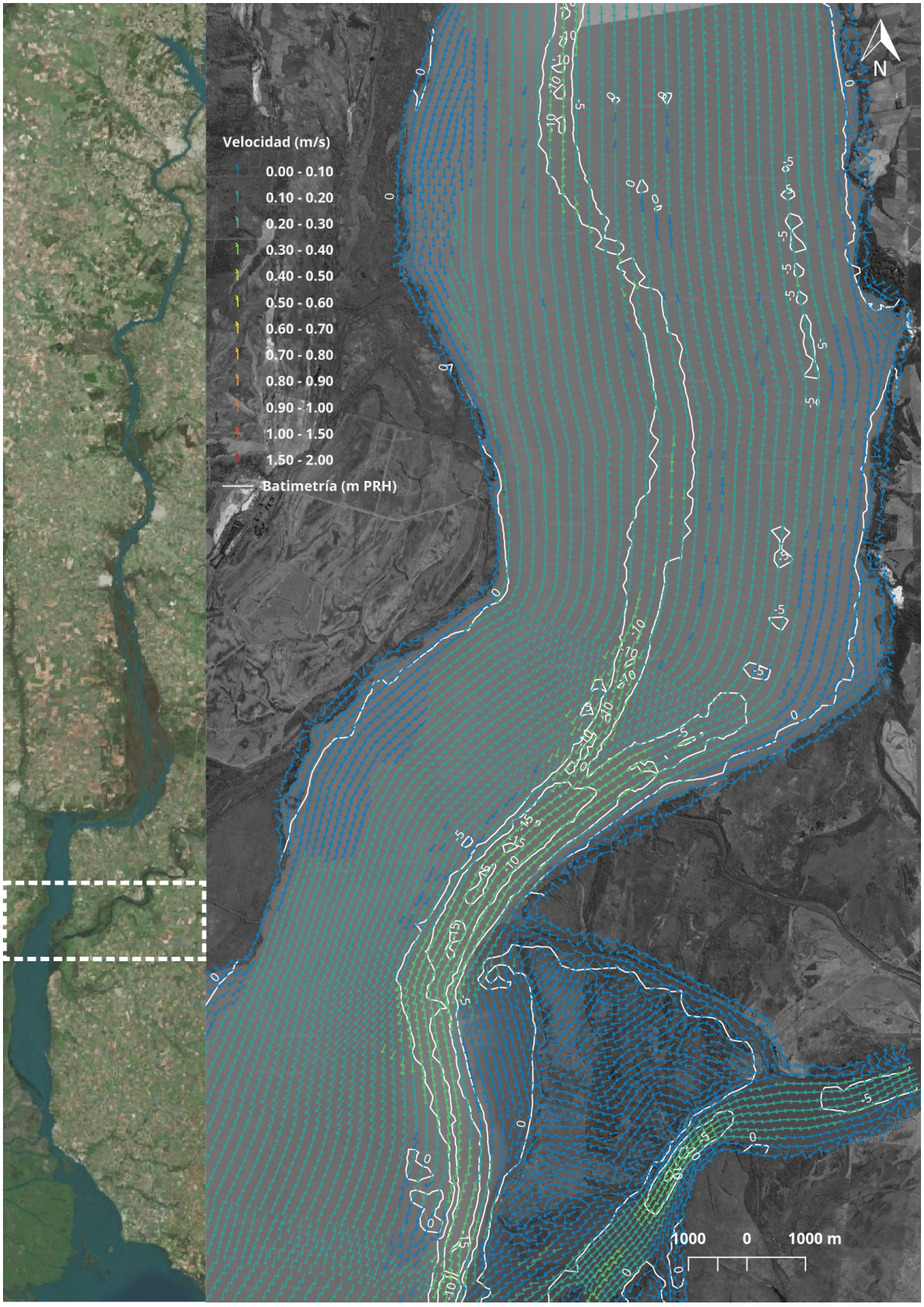


Figura 6.20: Campo de velocidad promedio, desde progresiva 82 km hasta progresiva 59 km.

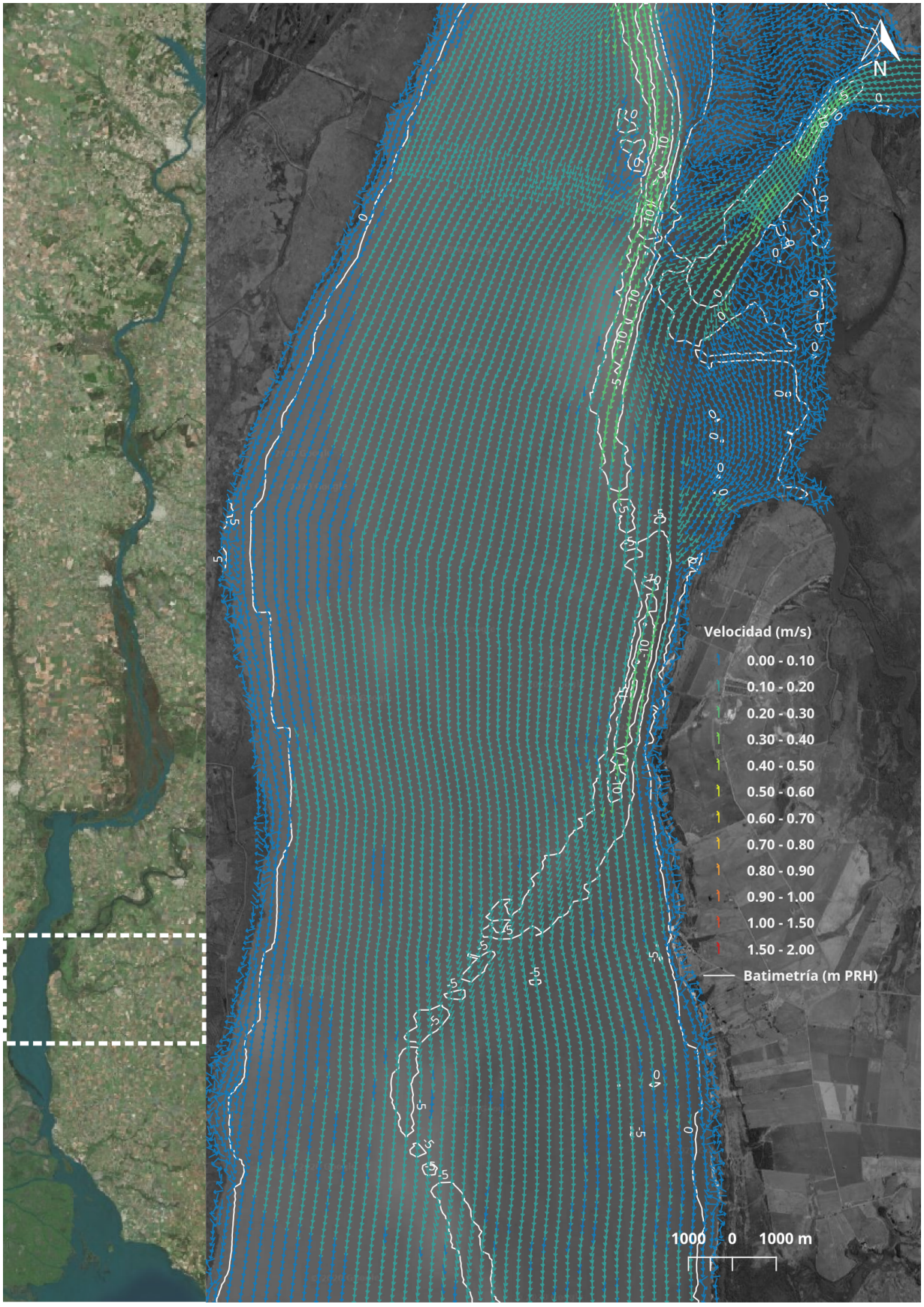


Figura 6.21: Campo de velocidad promedio, desde progresiva 63 km hasta progresiva 32 km.

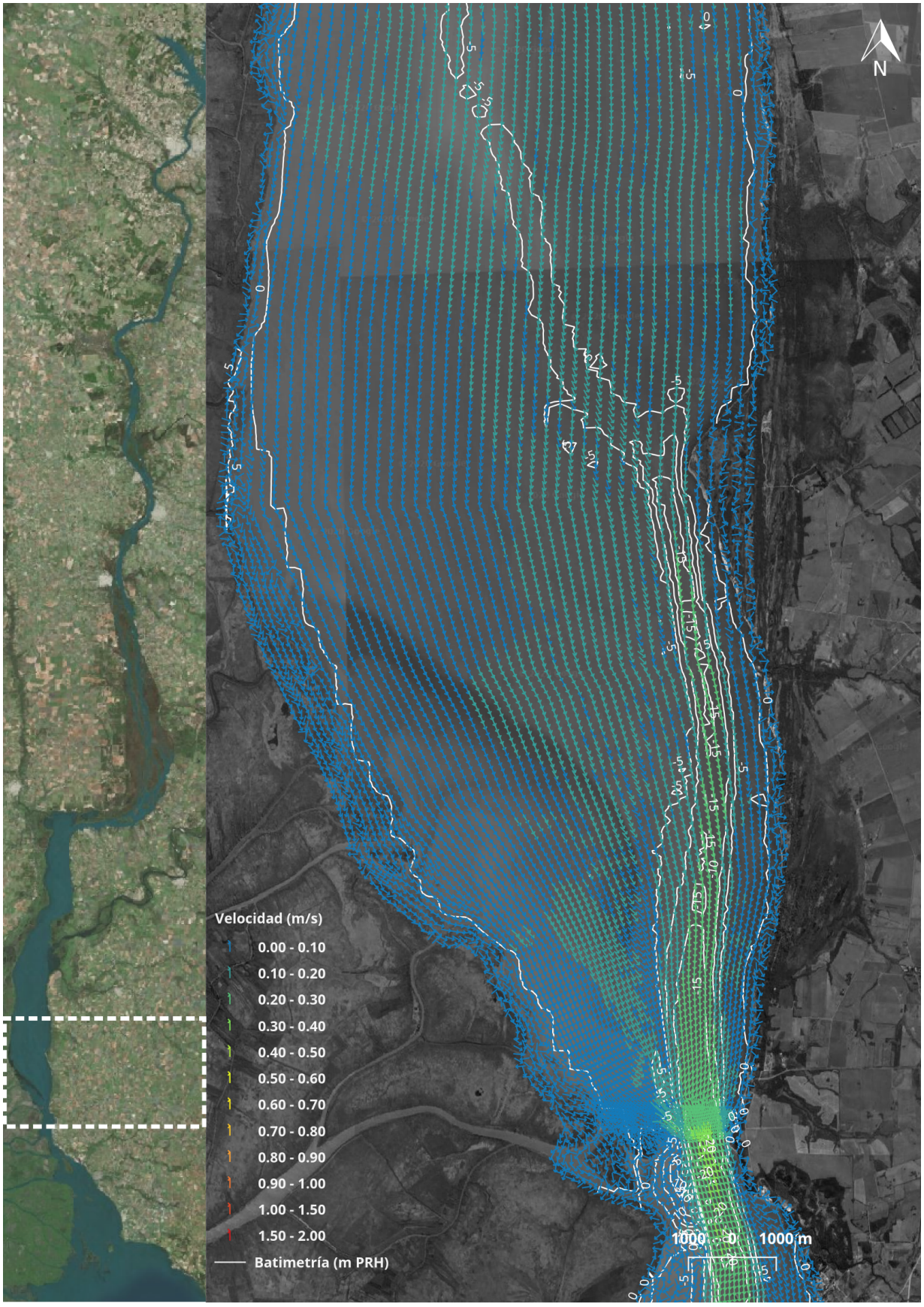


Figura 6.22: Campo de velocidad promedio, desde progresiva 38 km hasta progresiva 7 km.

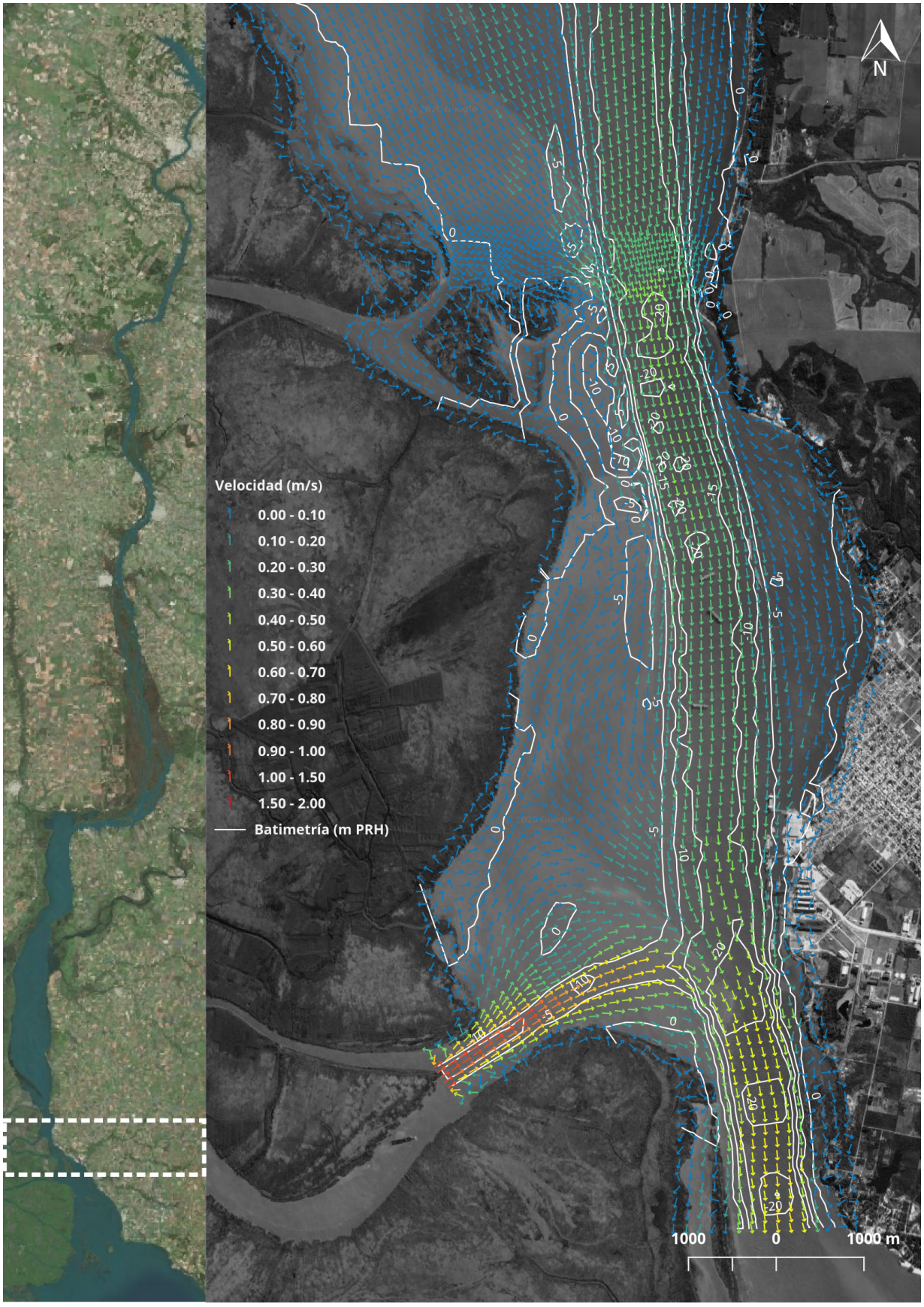


Figura 6.23: Campo de velocidad promedio, desde progresiva 14 km hasta progresiva 0 km.

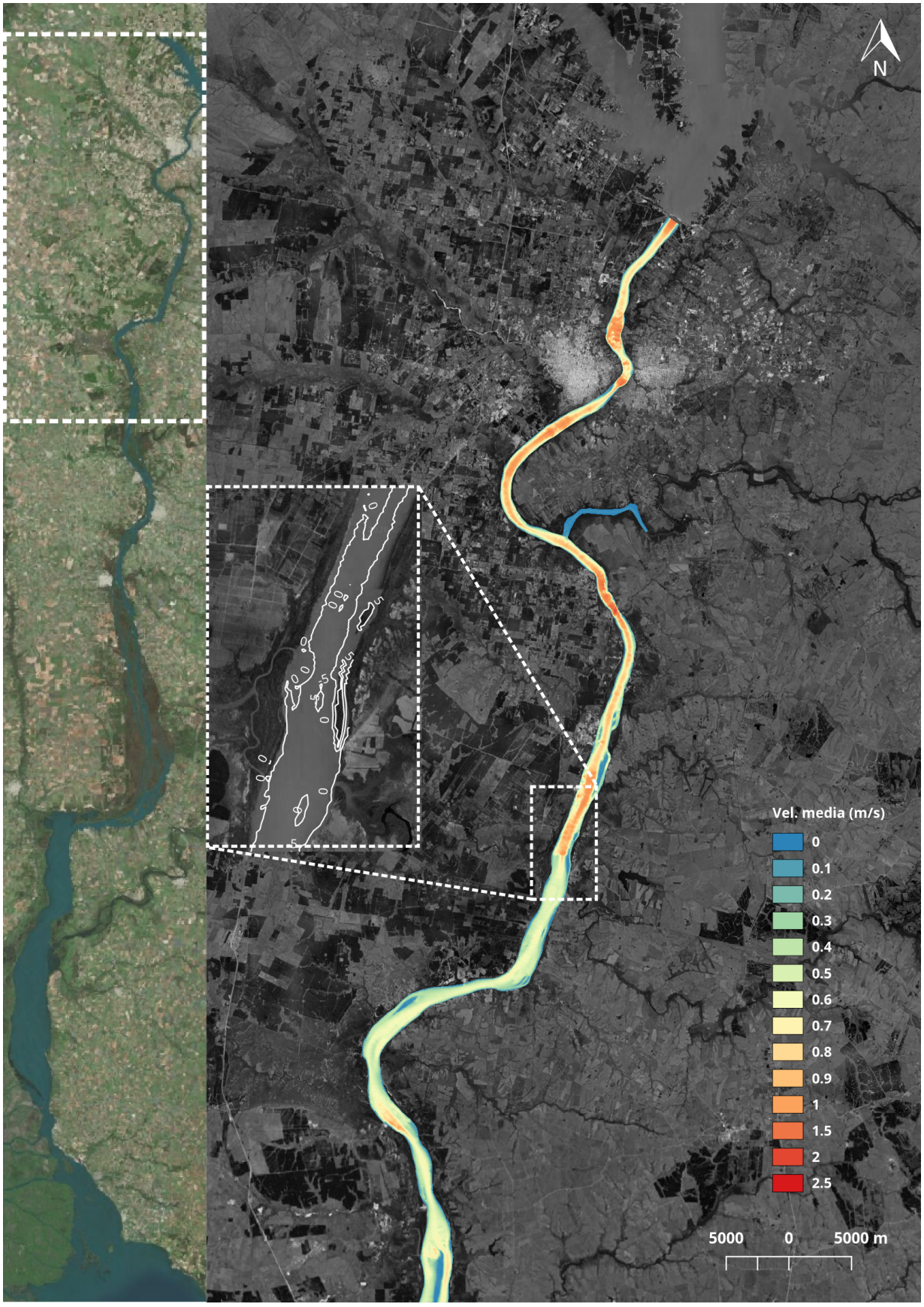


Figura 6.24: Módulo de velocidad promedio, Tramo 1. En recuadro blanco se muestra acercamiento a la batimetría de la zona de cambio abrupto de velocidades.

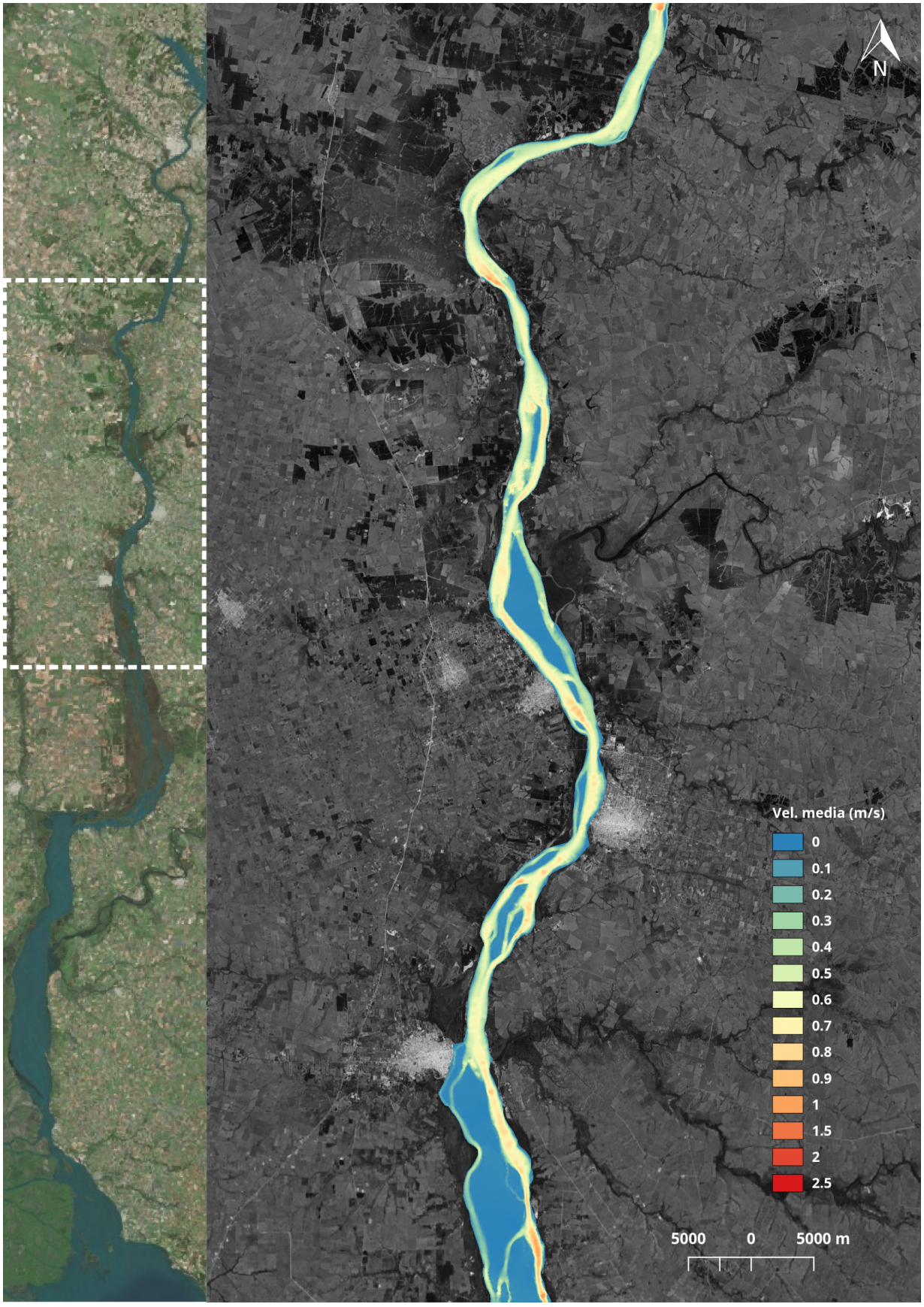


Figura 6.25: Módulo de velocidad promedio, Tramo 2, zona Norte.

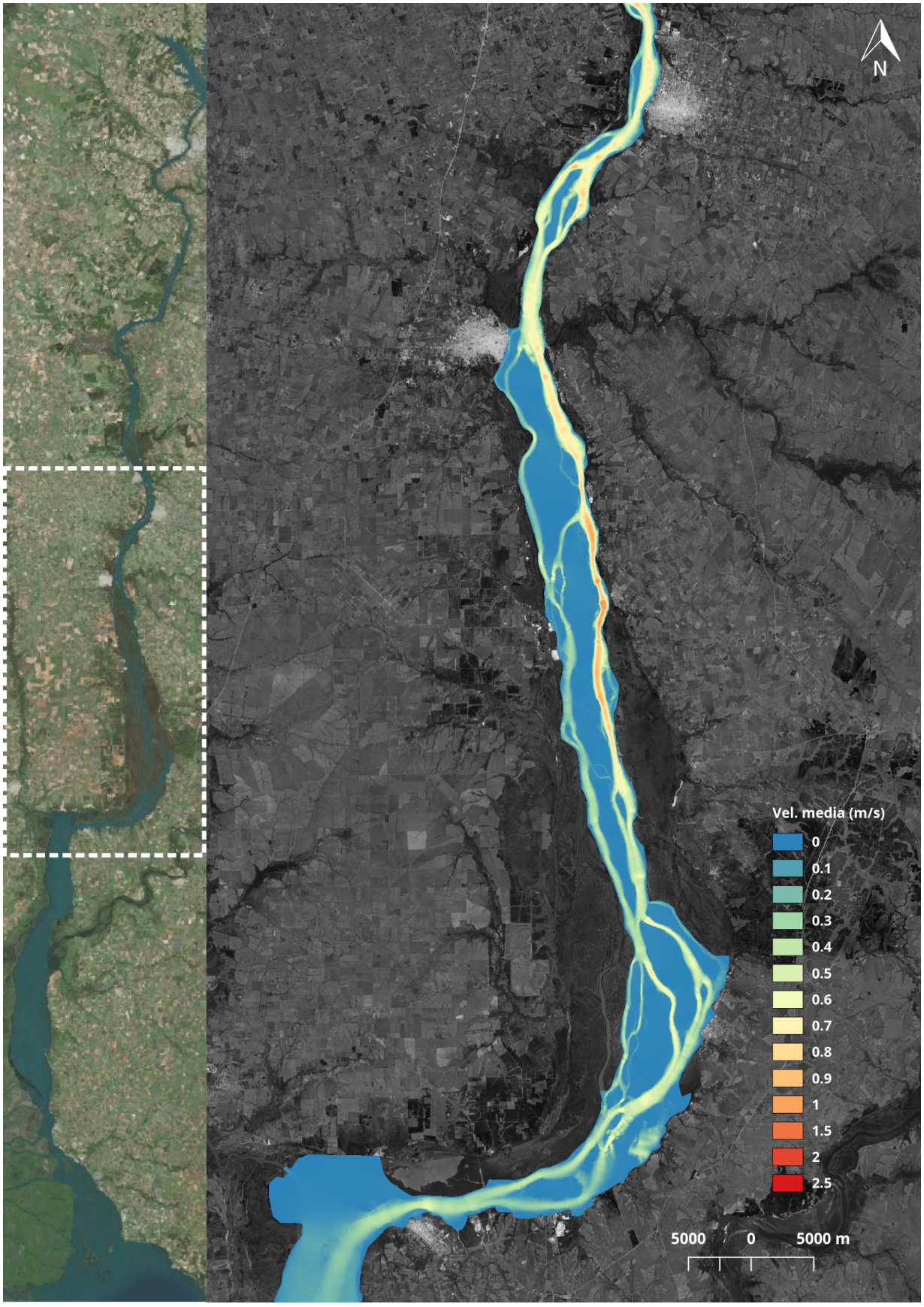


Figura 6.26: Módulo de velocidad promedio, Tramo 2, zona Sur.

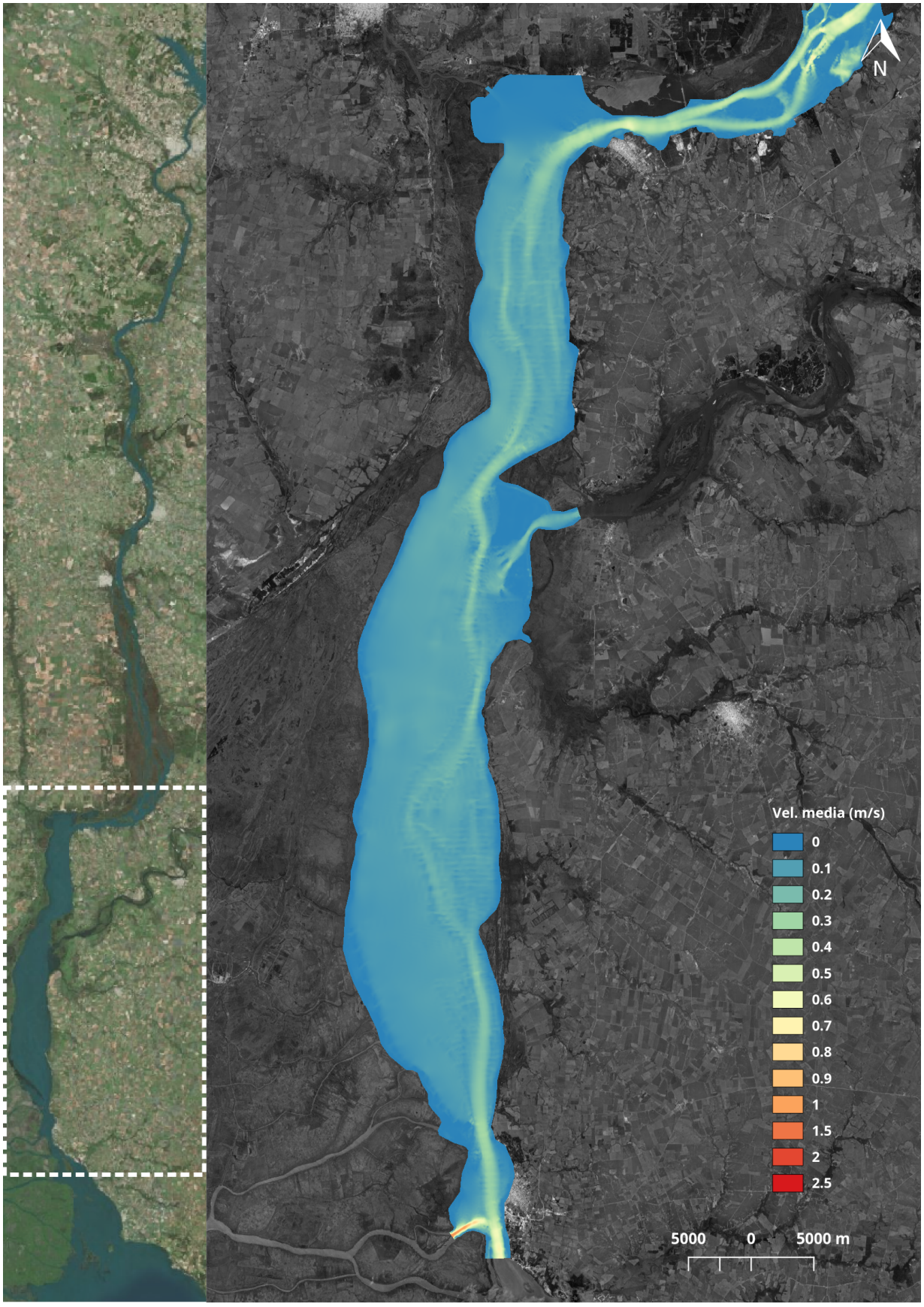


Figura 6.27: Módulo de velocidad promedio, Tramo 3.

6.3. Sentido de flujo

En esta sección se analiza la fracción de tiempo del sentido de flujo. Esta se calcula partiendo de los vectores de velocidad promedio para cada punto de la grilla de cálculo, con los cuales se obtienen la dirección y sentido promedio de flujo, y se genera un campo vectorial unitario, dividiendo cada vector velocidad por su módulo. Sobre este último se proyecta la serie temporal del campo de velocidades, obteniendo así un campo escalar dependiente del tiempo. De este modo, para cada punto del dominio de cálculo se tiene una serie temporal escalar correspondiente a la proyección del vector velocidad instantáneo sobre la dirección promedio. En este campo los valores positivos corresponden a velocidades con componente hacia aguas abajo, y los negativos a velocidades con componente hacia aguas arriba. La velocidad proyectada se utiliza para determinar en cada punto del dominio la fracción de tiempo de permanencia del flujo en cada sentido. La fracción de tiempo con flujo en sentido aguas abajo se denota como "FTaa", mientras que la de flujo con sentido aguas arriba se denota como "FTAA", las cuales evidentemente son complementarias. En base a estos porcentajes de tiempo se determinan las zonas del río afectadas en distinto grado por inversiones de flujo.

Cabe aclarar, de acuerdo a lo observado en el análisis del campo promedio de velocidades en la sección 6.2, que dada la dinámica de secado-mojado de las celdas del dominio de cálculo sobre las islas y márgenes del río, la dirección promedio de flujo en esos puntos no necesariamente tiene el mismo significado que la analizada sobre el cauce, donde la presencia de agua es permanente.

Para ilustrar mejor este punto, es de interés analizar la fracción de área del río en la que se dan los distintos valores de la FTaa, cuyo histograma se presenta en la figura 6.28. Para la obtención del histograma se interpolan los valores de la FTaa de los nodos de la grilla de cálculo, a una grilla uniforme con elementos de 10 m de lado, de modo que el resultado sea independiente de la densidad de nodos en la grilla de cálculo en las distintas zonas. De este modo se garantiza que áreas del mismo tamaño del río tengan el mismo peso al momento del conteo de casos para el histograma.

Según se puede ver en el histograma, la mayoría de los casos se agrupan alrededor del la categoría de 0,80 a 0,85, con casi un 55 % de ellos entre valores de 0,80 a 0,90 de FTaa. Los casos por encima de 0,90 suman un 25 % adicional. El 90 % de los casos queda comprendido en el rango de FTaa por encima de 0,60, aproximadamente. Se observa un pequeño pico en la cola izquierda de la distribución, para valores de FTaa entre 0,05 y 0,10, los cuales corresponden a las zonas de islas y las márgenes del río. En términos generales, todos los valores de FTaa inferiores a 0,60 corresponden a zonas de islas y márgenes del río, según se muestra en la figura 6.29. En esta se puede apreciar que el Tramo 1 es el que tiene menor cantidad de celdas con valores de FTaa inferiores a 0,60, mientras que la presencia de estas incrementa fuertemente en el Tramo 2 por la presencia de islas, donde aparecen los valores más bajos de FTaa, y luego

vuelve a disminuir en el Tramo 3, donde se ven valores inferiores a 0,60 sobre las márgenes del río y en las cercanías de la desembocadura del río Negro, sobre isla Lobos.

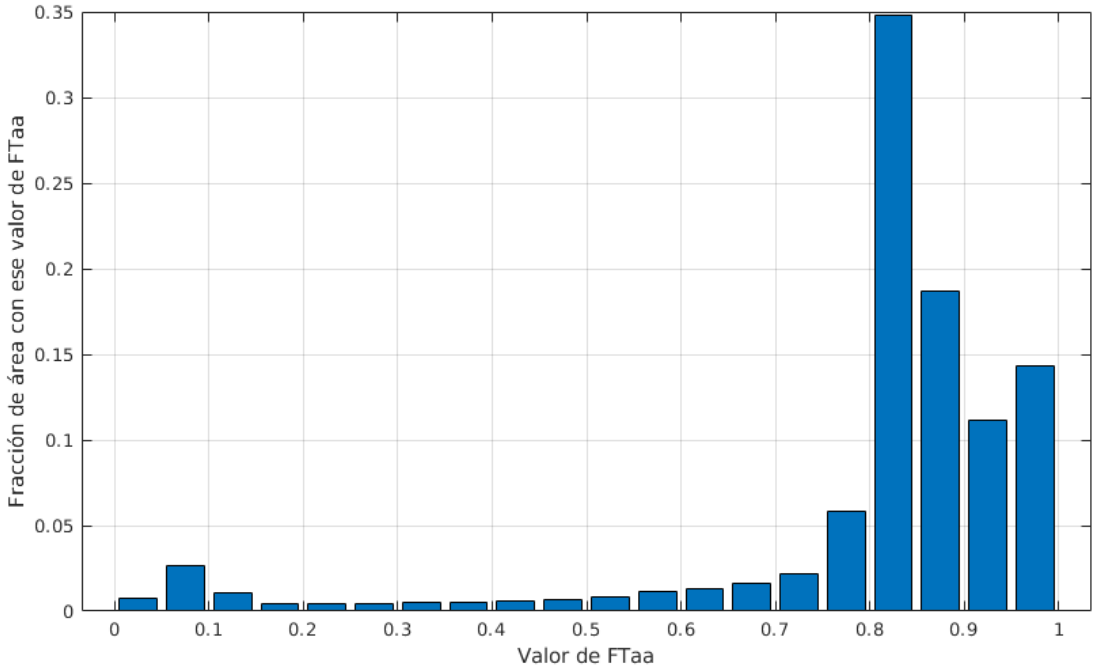


Figura 6.28: Fracción de área del río por rangos de valor de FTaa. Las categorías para el conteo de casos son 20, con un ancho de 0,05.

En función de lo anterior, se entiende pertinente analizar la distribución espacial de los valores de FTaa superiores a 0,60, que cubren el 90 % de la superficie del río analizada, y se asocian principalmente al cauce y las zonas con presencia de agua más permanente.

En la figura 6.30 se muestra la distribución espacial de la FTaa para el Tramo 1, observándose que en su cauce principal esta toma un valor de 1, lo cual indica que este tramo se ve muy poco afectado por los eventos de inversión de flujo, teniendo la gran mayoría del tiempo un campo de velocidad con igual dirección y sentido que el promedio. Se observan valores menores en las cercanías de islas, contracciones del cauce que puedan generar recirculaciones en sus laterales, zonas de poca profundidad, como Salto Chico, y sobre parte de las márgenes. Se puede interpretar que en esas zonas el flujo es más variable, ya sea por la aparición de patrones de recirculación en determinadas condiciones de caudal y nivel, o porque corresponden a celdas del dominio de cálculo sometidas a ciclos de secado-mojado, siendo éstos efectos locales, no necesariamente relacionados a eventos de inversión de flujo globales en el río.

En el Tramo 2 por su parte, presentado en las figuras 6.31 y 6.32, se aprecia una gradación del valor de la FTaa, que va disminuyendo de Norte a Sur, desde valores en su mayoría superiores a 0,95 para la zona Norte, aguas arriba de la ciudad de Concepción del Uruguay, Argentina, hasta valores del orden de 0,90 al final de este Tramo, aguas arriba de la ciudad de Fray Bentos, Uruguay. Para la zona Sur del Tramo 2 se observa que el brazo Este del río, que presenta mayores

velocidades promedio en comparación con el brazo Oeste (ver sección 6.2), tiene mayores valores de FTaa, de aproximadamente 0,95, comparados con los de 0,90 presentados en el brazo Oeste. Esto indica que este último se ve sometido a inversiones de flujo con mayor frecuencia que el Este, lo cual puede deberse al menor valor de las velocidades. Valen las mismas observaciones respecto al comportamiento de márgenes y zonas cercanas a islas que las realizadas para el tramo anterior.

Ya en el Tramo 3, mostrado en la figura 6.33, se puede observar que el valor de la FTaa disminuye de Norte a Sur, pasando de 0,90 en la zona de Fray Bentos, hasta valores de entre 0,75 y 0,80 aguas arriba de la contracción del cauce al Norte de Nueva Palmira. Cabe destacar asimismo que el canal principal, donde se tienen las mayores profundidades y velocidades de este tramo, presenta siempre una FTaa mayor que en las inmediaciones, donde la profundidad de agua y velocidad promedio son menores. En este tramo también valen las observaciones realizadas en los anteriores respecto al comportamiento de la FTaa en islas y márgenes del río, agregando que los valores altos observados en las cercanías de las condiciones de borde en caudales, como las desembocaduras de los ríos Gualeguaychú, Negro y Paraná Bravo, no necesariamente son representativos de la dinámica real de esas zonas, dado que tienen impuesto un flujo entrante al dominio de cálculo. Es esperable que en términos reales la FTaa tome valores menores en esas zonas.

En términos globales se observa entonces una clara diferencia en el comportamiento de los Tramos 1, 2 y 3, disminuyendo el valor de la FTaa de Norte a Sur, con transiciones bastante marcadas entre éstos, siendo el Tramo 3 el más afectado por eventos de inversión de flujo, con valores incluso superiores al 20 % del tiempo. Se observa asimismo que las zonas que presentan mayores velocidades promedio, en general se ven menos afectadas por eventos de inversión de flujo, en comparación con zonas cercanas que presentan velocidades promedio menores.

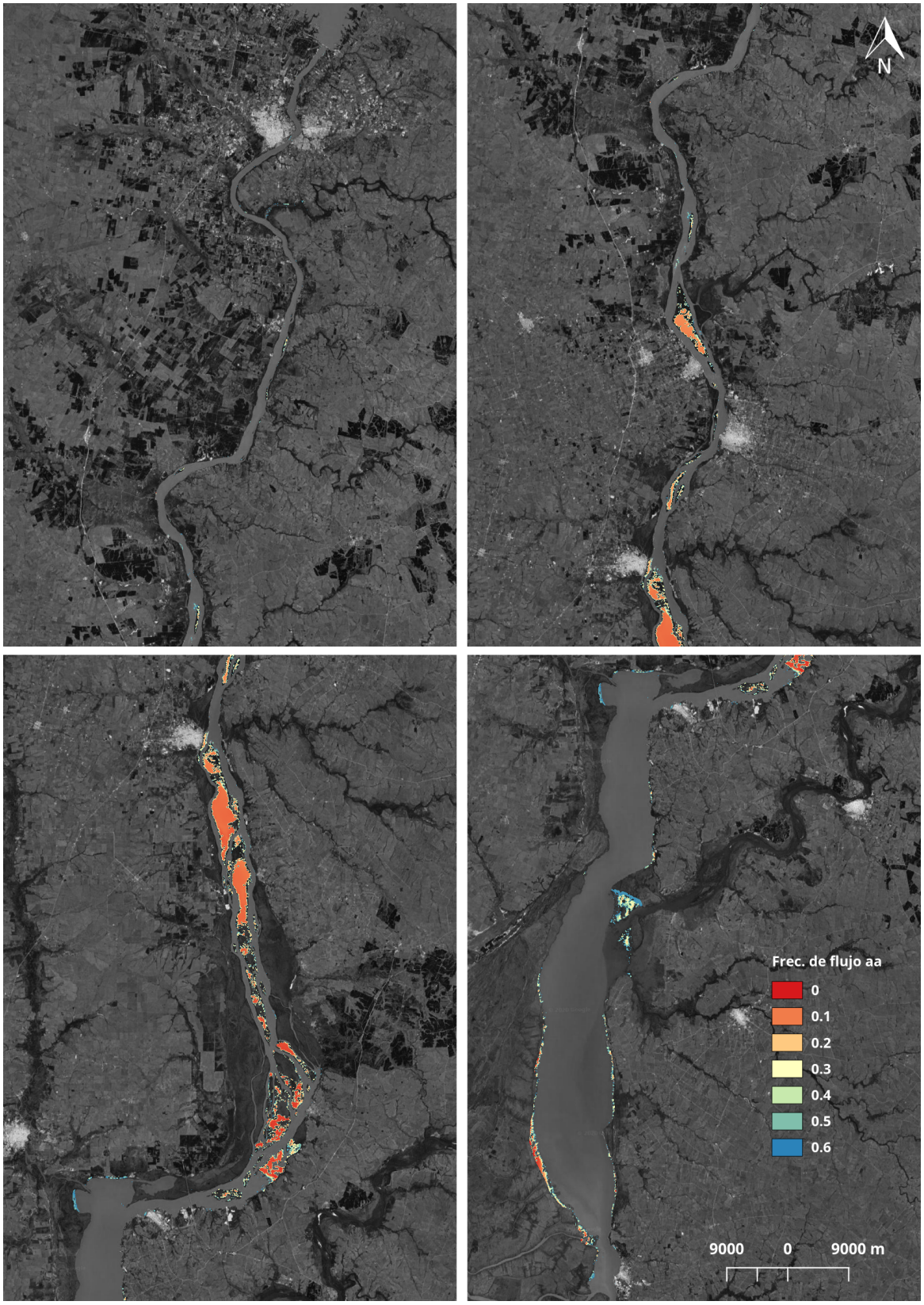


Figura 6.29: Distribución espacial de FTaa menor a 0,60. De izquierda a derecha y arriba hacia abajo: Tramo 1, Tramo 2 zona norte, Tramo 2 zona sur, Tramo 3.

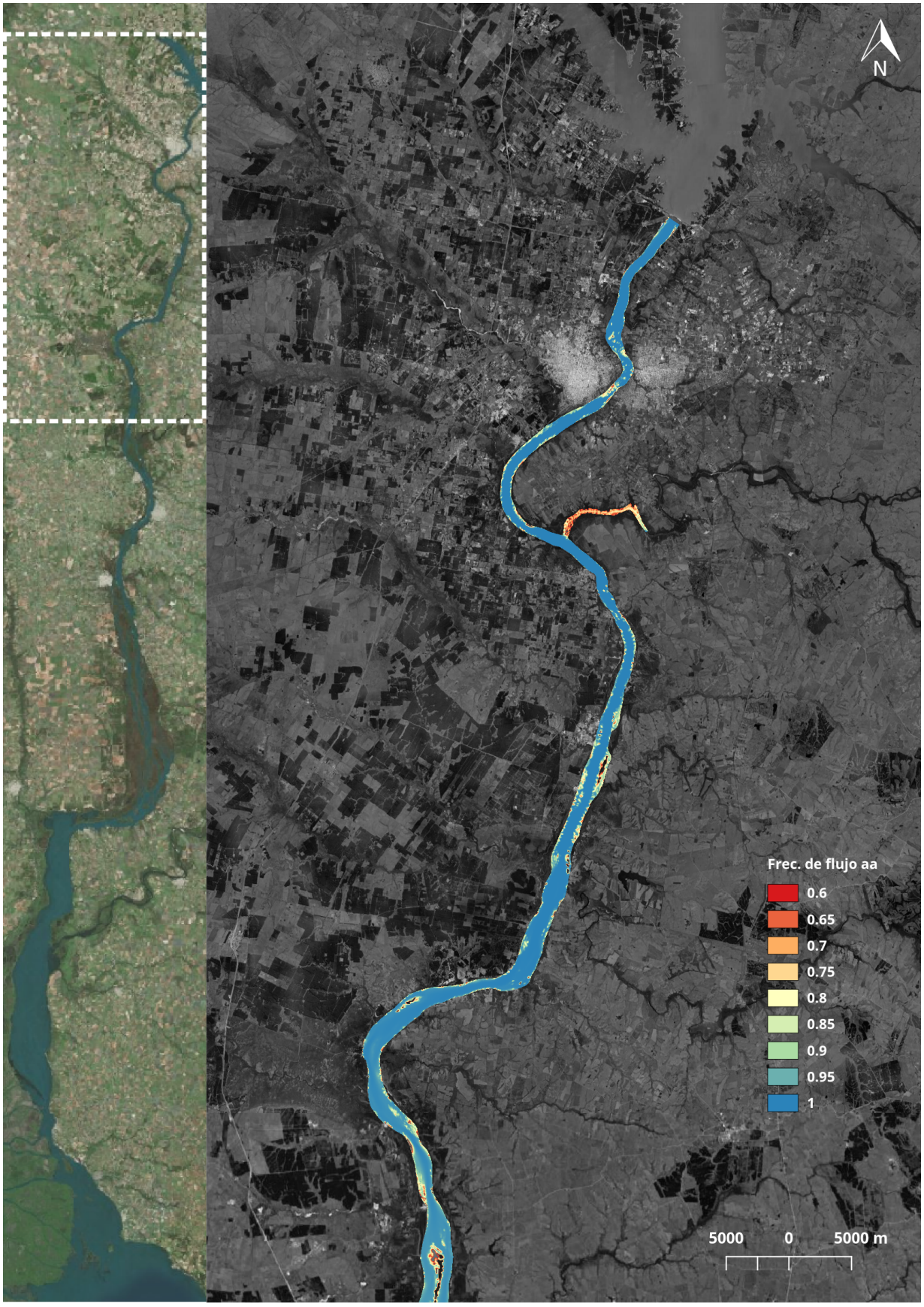


Figura 6.30: Distribución espacial de FTaa mayor a 0,6, Tramo 1.

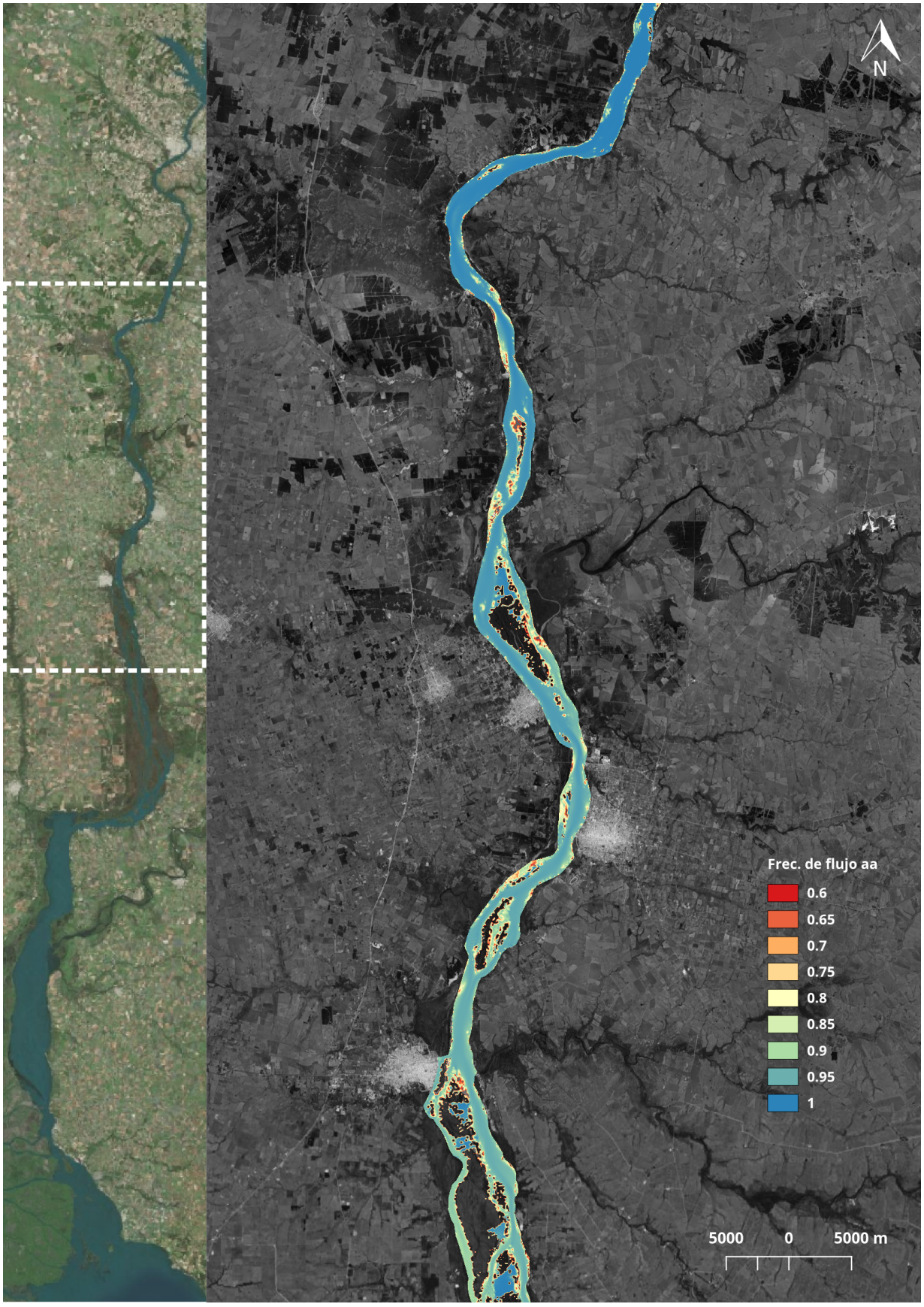


Figura 6.31: Distribución espacial de FTaa mayor a 0,6, Tramo 2, zona Norte.

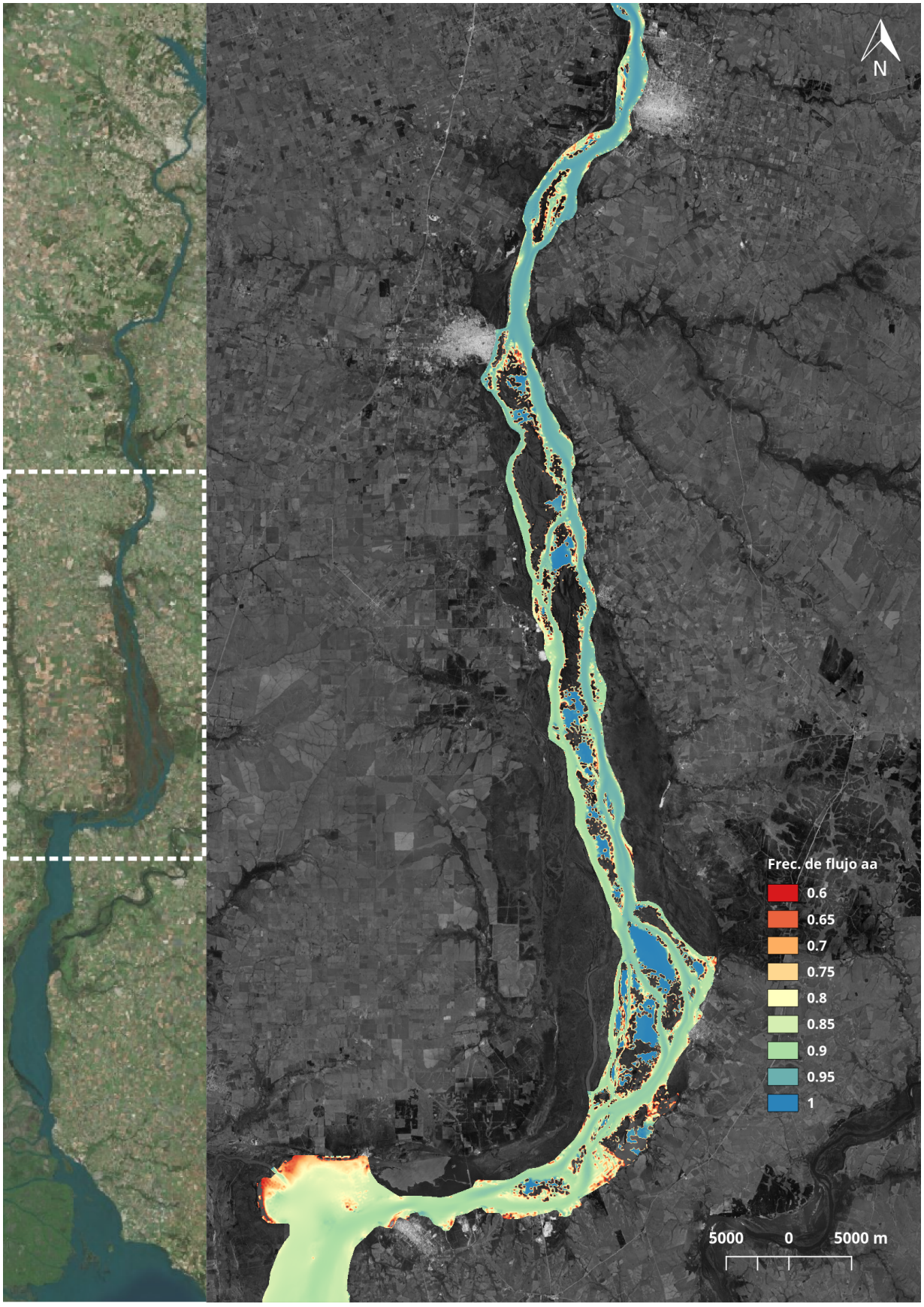


Figura 6.32: Distribución espacial de FTaa mayor a 0,6, Tramo 2, zona Sur.

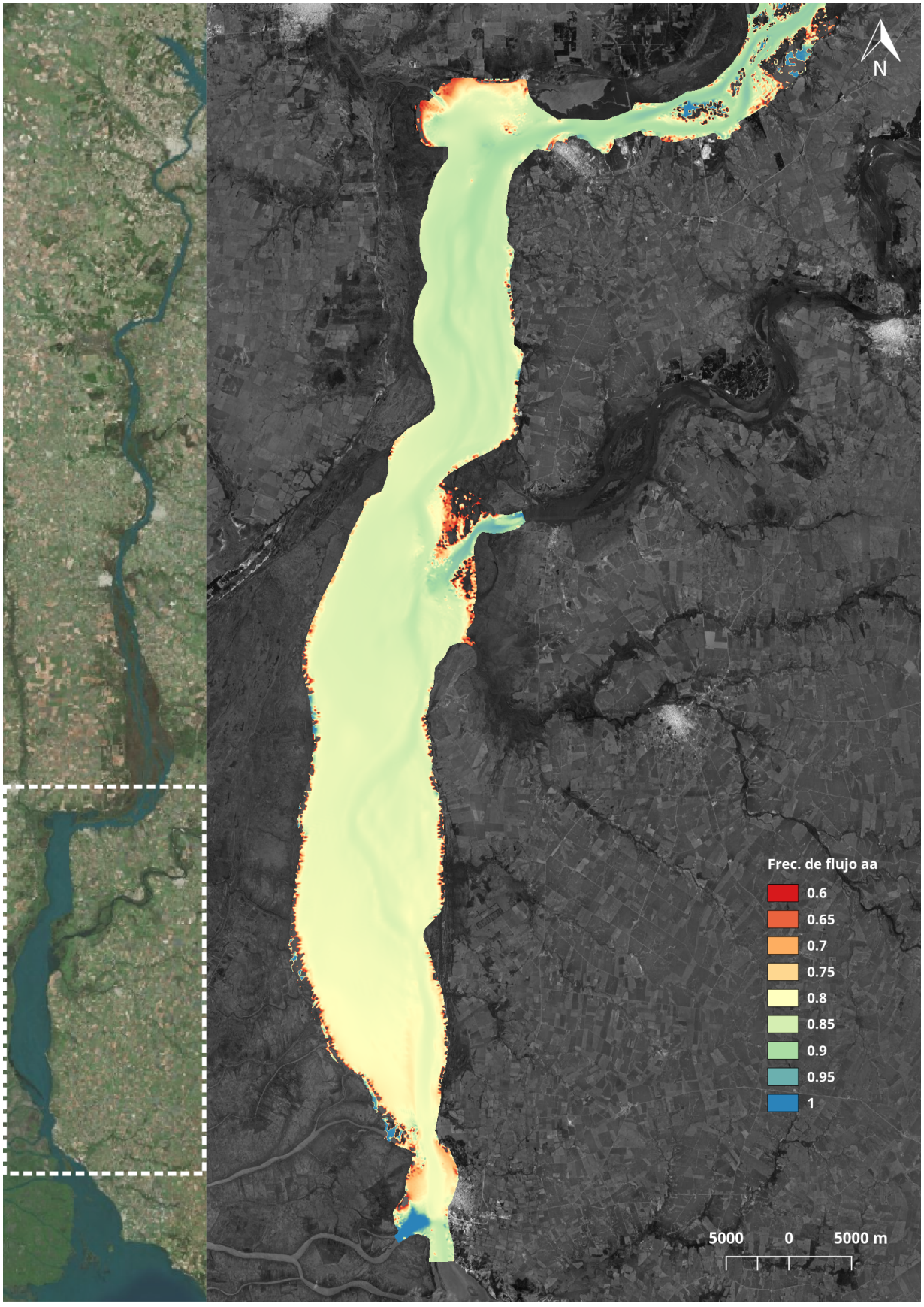


Figura 6.33: Distribución espacial de FTaa mayor a 0,6, Tramo 3.

6.4. Propagación de ondas aguas arriba

El análisis realizado en la sección 6.3 permite determinar la influencia de los eventos de inversión de flujo en toda la extensión del dominio de cálculo, en términos del porcentaje de tiempo relativo a los 7 años simulados, en que el flujo tiene sentido contrario al flujo medio. De modo de complementar el análisis anterior, interesa analizar la naturaleza de la propagación de las ondas de inversión de flujo aguas arriba. Para ello, en esta sección se implementa una metodología que permite visualizar gráficamente la evolución temporal del sentido y velocidad del flujo a lo largo del tramo en estudio, relacionando lo anterior con los forzantes de caudal erogado por Salto Grande y nivel en Nueva Palmira; se estudia la distribución espacial de la frecuencia de ocurrencia de la duración y velocidad de los eventos, analizando también la distribución conjunta de ocurrencia de estas variables; y se propone e implementa una metodología para identificar y caracterizar eventos de inversión de flujo individuales en términos de su duración y velocidad a lo largo del cauce y de su distancia máxima de propagación, explorando la relación de estas variables con los forzantes de caudal y nivel ya mencionados.

Para este análisis se consideran las series temporales de velocidad en puntos sobre el eje del canal principal, ubicados cada 1 km (figura 6.34). El vector velocidad en cada uno de los puntos es proyectado según la dirección y sentido del vector velocidad promedio en ese punto (con la misma metodología utilizada en la sección 6.3). De este modo se obtiene una matriz de datos con tantas filas como puntos utilizados (351), y tantas columnas como número de datos por punto (61.164, con 1 dato por hora durante los 7 años simulados). Representando gráficamente esta matriz para lapsos de tiempo de 6 meses se obtiene el resultado mostrado en las figuras 6.35 a 6.48, en las cuales en tonos de amarillo y rojo se muestran las velocidades positivas, indicando con blanco las nulas, y en tonos de azul las negativas, correspondientes a eventos de inversión de flujo. Se presentan asimismo en la parte superior de cada figura la serie de caudales erogados por Salto Grande, y en la inferior la serie de nivel de superficie libre en Nueva Palmira.

Analizando estas figuras se observa nuevamente la alta variabilidad temporal de la dinámica durante los 7 años simulados, influenciada claramente por los caudales fluviales y niveles. Para observar en detalle dicha influencia en la figura 6.49 se presenta un acercamiento donde se visualiza un lapso de tiempo de 28 días en un momento de caudales bajos erogados por Salto Grande. En esta se puede ver claramente como los eventos de inversión de flujo quedan representados como columnas con inclinación hacia la derecha, indicando que estas ondas ingresan desde la frontera Sur del dominio de cálculo, en la progresiva 0 km, y se propagan aguas arriba, llegando en los eventos más marcados casi 300 km aguas arriba. En base a la pendiente de estas columnas, se estima una velocidad de propagación de entre 15 a 20 km/h para las ondas de inversión de flujo.

En la figura 6.50 se muestra el mismo lapso de tiempo, pero para un momento de caudales altos erogados por Salto Grande. En esta puede verse como las inversiones de flujo son aplacadas, en términos de su propagación río arriba, por las velocidades más altas asociadas a esos caudales. Asimismo, las ondas de crecida asociadas a caudales altos de Salto Grande pueden verse como columnas también inclinadas hacia la derecha, pero comenzando desde la parte superior de la imagen, en la progresiva 351 km, y propagándose aguas abajo.

En las figuras 6.49 y 6.50 puede observarse además que los eventos de inversión de flujo tienen distinta duración en el tiempo, y que esta a su vez disminuye a medida que una onda de inversión avanza aguas arriba.

Para conocer cómo es la distribución de la duración de los eventos de inversión de flujo y cómo varía a lo largo del río se presenta en la figura 6.51 la distribución espacial de la cantidad de ocurrencias de inversión de flujo según su duración en horas. Se realiza este cálculo considerando los puntos hasta la progresiva 300 km pues por encima de esta no se registran casos de inversión en el periodo simulado. Los resultados muestran una disminución de la ocurrencia de Sur a Norte, coincidente con lo obtenido del análisis presentado en la sección 6.3. Asimismo, se observa la ocurrencia de una primer moda en torno a las 5 horas de duración, donde se encuentran la mayoría de los casos, y una segunda moda en torno a las 17 horas de duración, las cuales se encuentran separadas por una banda con menor cantidad de ocurrencias. Esto se puede apreciar más claramente en el histograma mostrado en la figura 6.52, el cual considera las ocurrencias en todas las progresivas mostradas en la figura 6.51.

Además de la duración de los eventos, interesa conocer las velocidades que estos pueden desarrollar, para lo cual se analiza la distribución de velocidades negativas para cada progresiva hasta el km 300 inclusive (figura 6.53). Se observa que el mayor rango de velocidades se da entre las progresivas 0 km y 25 km aproximadamente, llegando en casos extremos a valores de hasta 1,5 m/s, estando la mayoría de estos ubicados en el rango de 0 a 0,2 m/s. Se observa asimismo que entre las progresivas 25 km a 150 km el rango de velocidades disminuye fuertemente, pero sin una tendencia clara, con valores máximos del orden de 0,8 m/s, y la mayoría de los valores concentrados en el rango de 0 a 0,2 m/s. De la progresiva 150 km en adelante, se observa una disminución prácticamente monótona del rango de velocidades de inversión de flujo, desde máximos del orden de 0,8 m/s, hasta valores nulos.

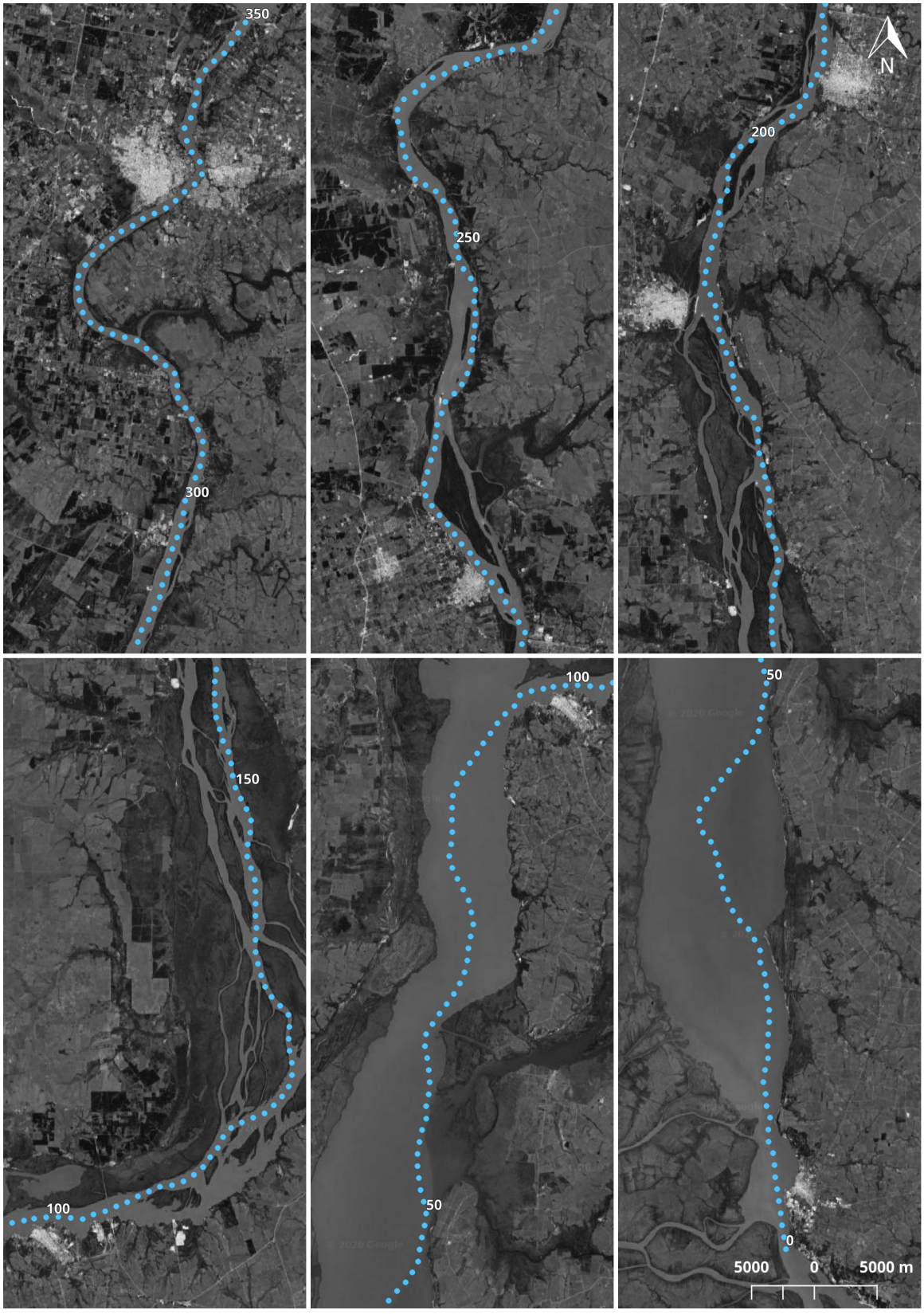


Figura 6.34: Puntos de extracción de datos (indicados en celeste, con etiqueta de la progresiva correspondiente cada 50 km).

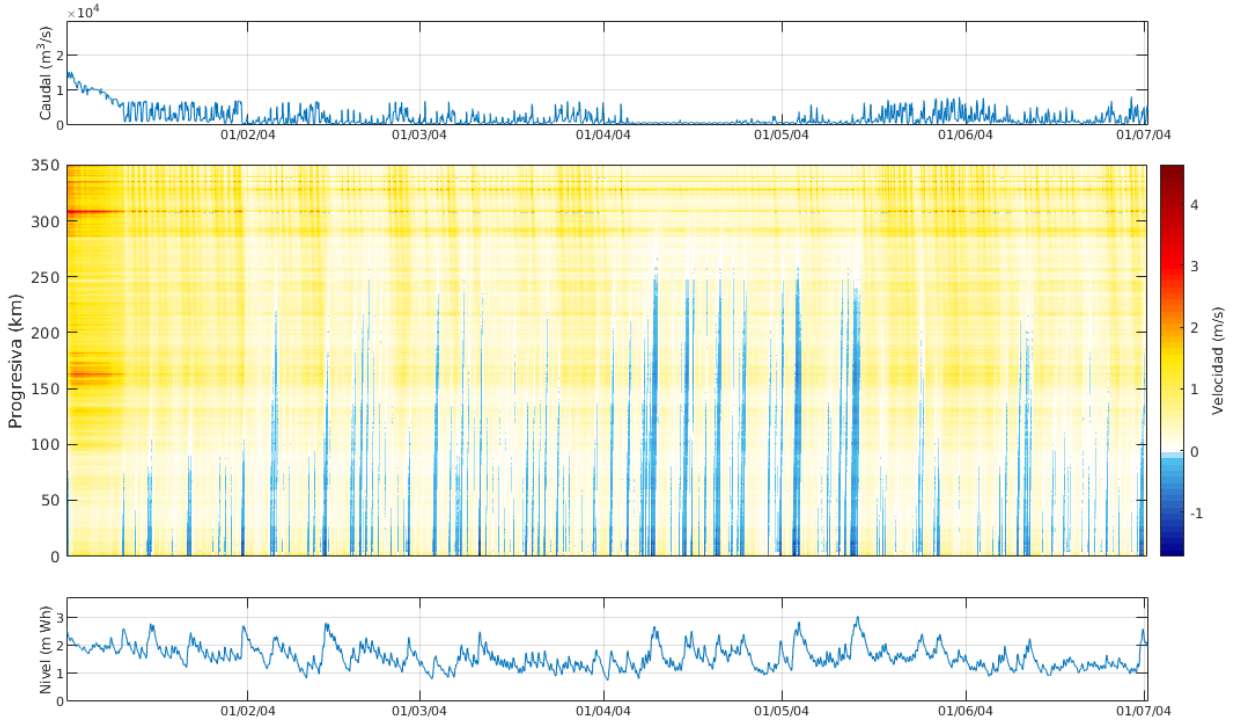


Figura 6.35: Módulo de velocidad con signo, primer semestre de 2004. Arriba: caudal erogado por Salto Grande; centro: módulo de velocidad con signo; abajo: nivel en Nueva Palmira

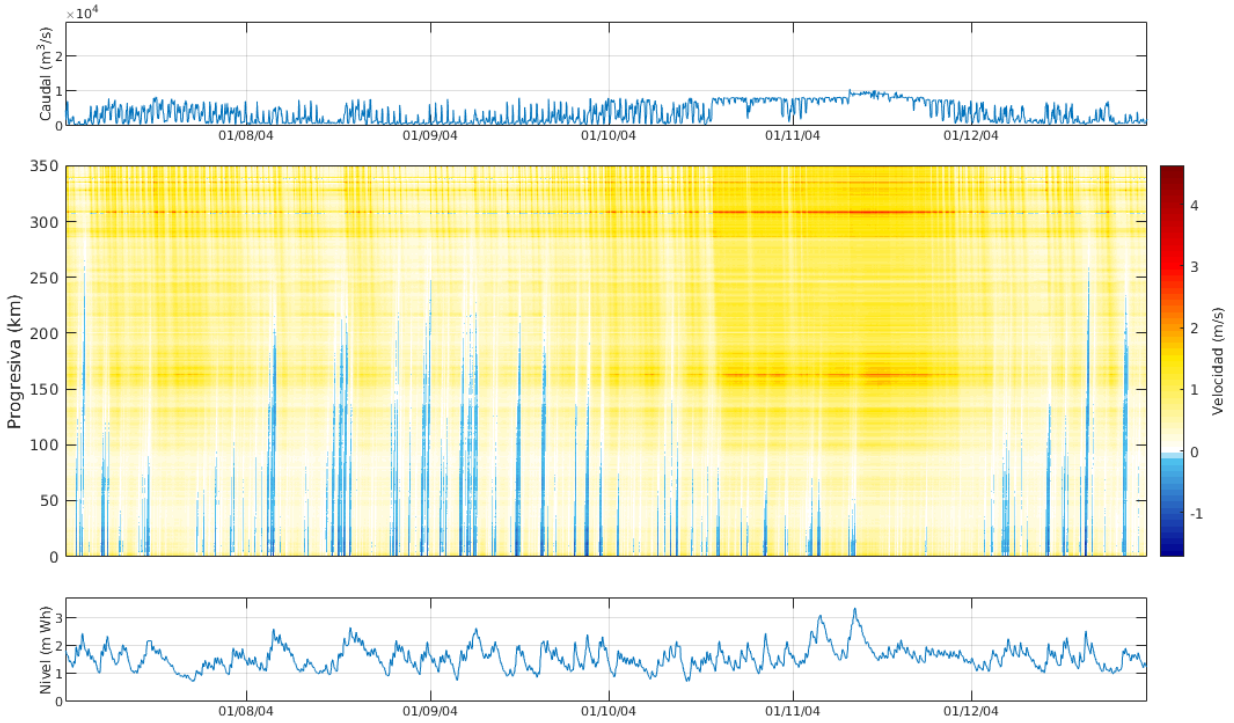


Figura 6.36: Módulo de velocidad con signo, segundo semestre de 2004. Arriba: caudal erogado por Salto Grande; centro: módulo de velocidad con signo; abajo: nivel en Nueva Palmira

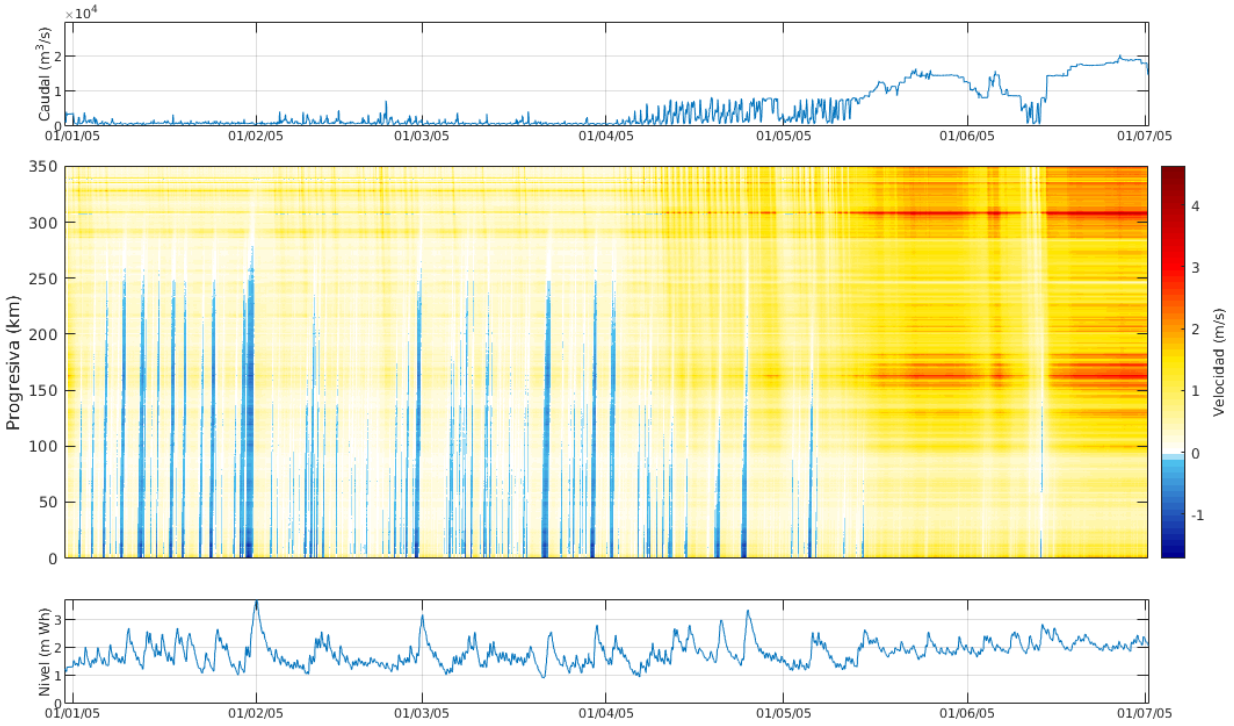


Figura 6.37: Módulo de velocidad con signo, primer semestre de 2005. Arriba: caudal erogado por Salto Grande; centro: módulo de velocidad con signo; abajo: nivel en Nueva Palmira

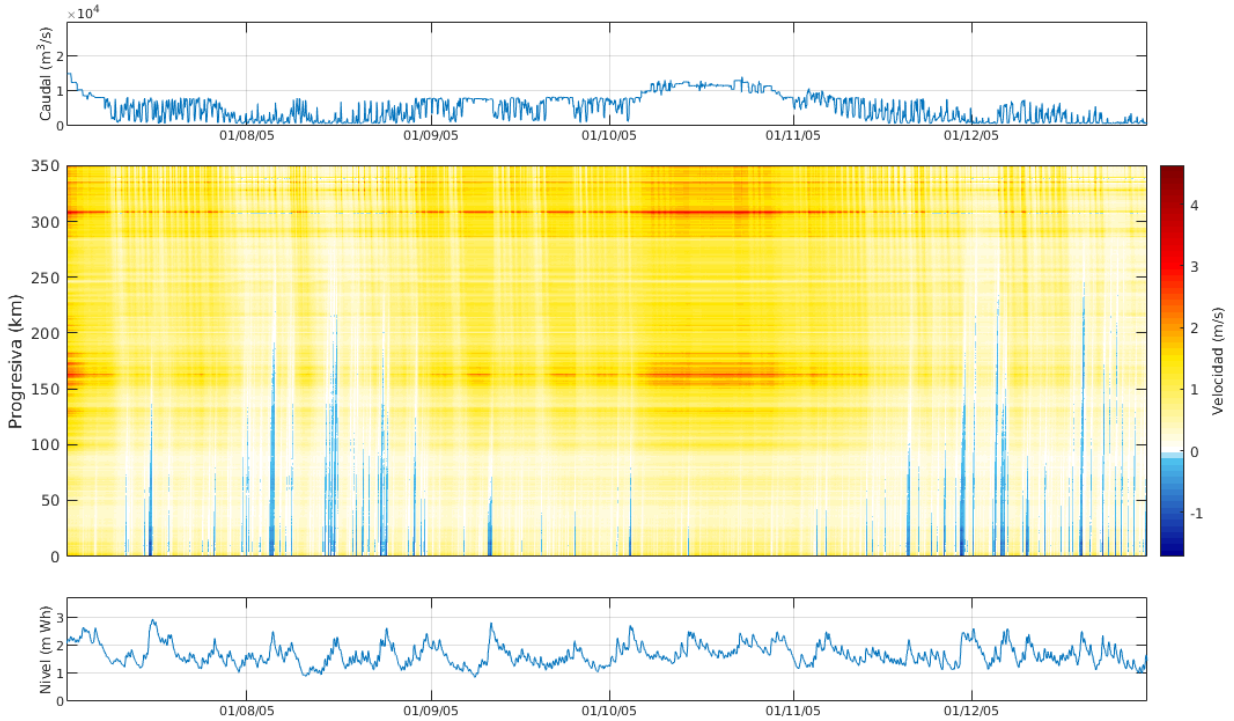


Figura 6.38: Módulo de velocidad con signo, segundo semestre de 2005. Arriba: caudal erogado por Salto Grande; centro: módulo de velocidad con signo; abajo: nivel en Nueva Palmira

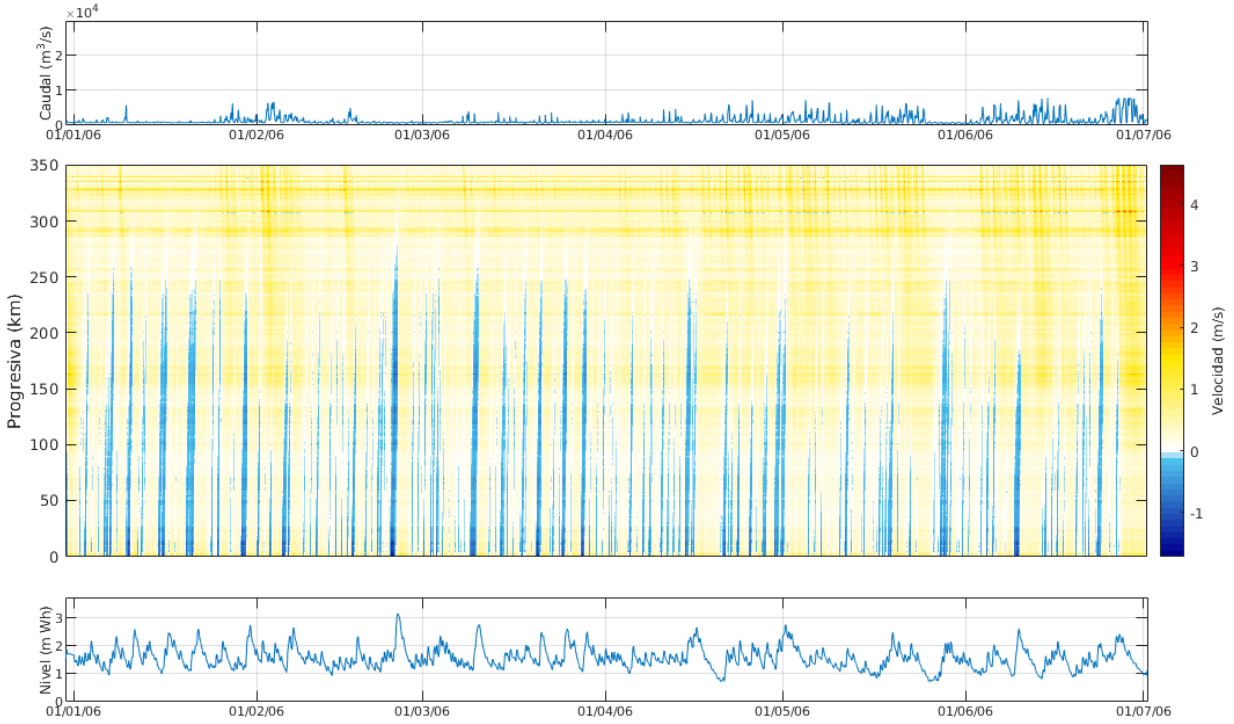


Figura 6.39: Módulo de velocidad con signo, primer semestre de 2006. Arriba: caudal erogado por Salto Grande; centro: módulo de velocidad con signo; abajo: nivel en Nueva Palmira

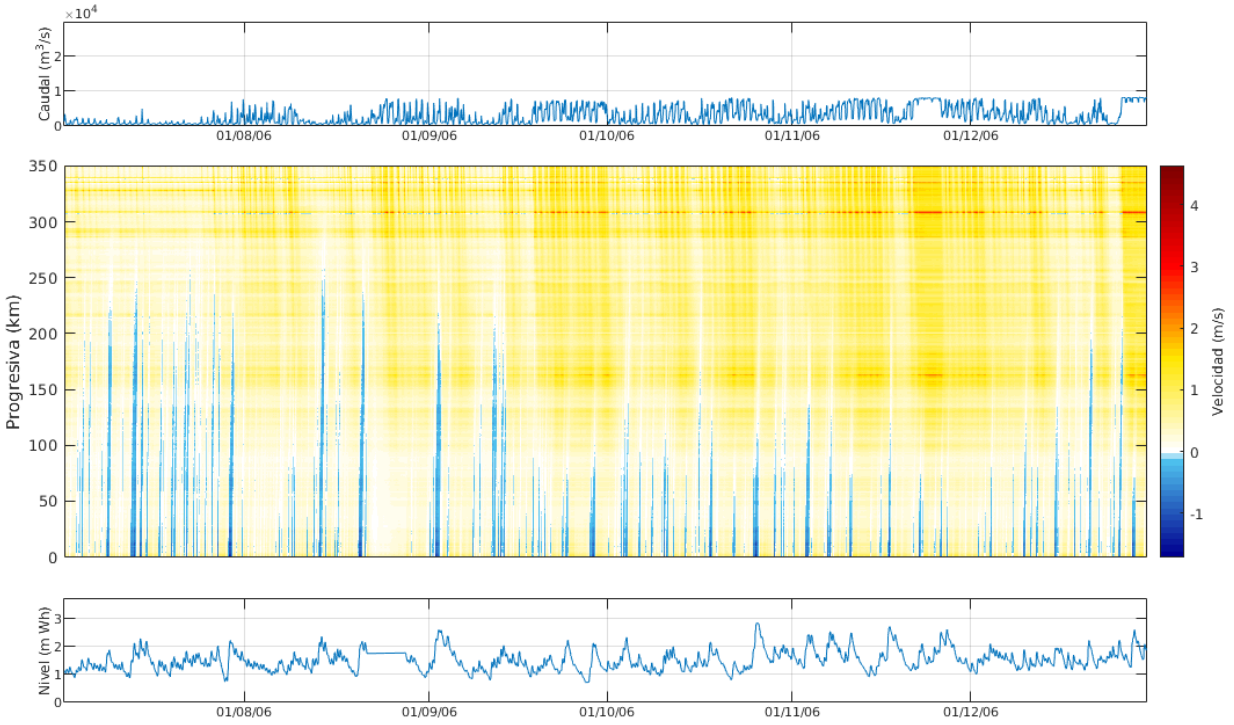


Figura 6.40: Módulo de velocidad con signo, segundo semestre de 2006. Arriba: caudal erogado por Salto Grande; centro: módulo de velocidad con signo; abajo: nivel en Nueva Palmira

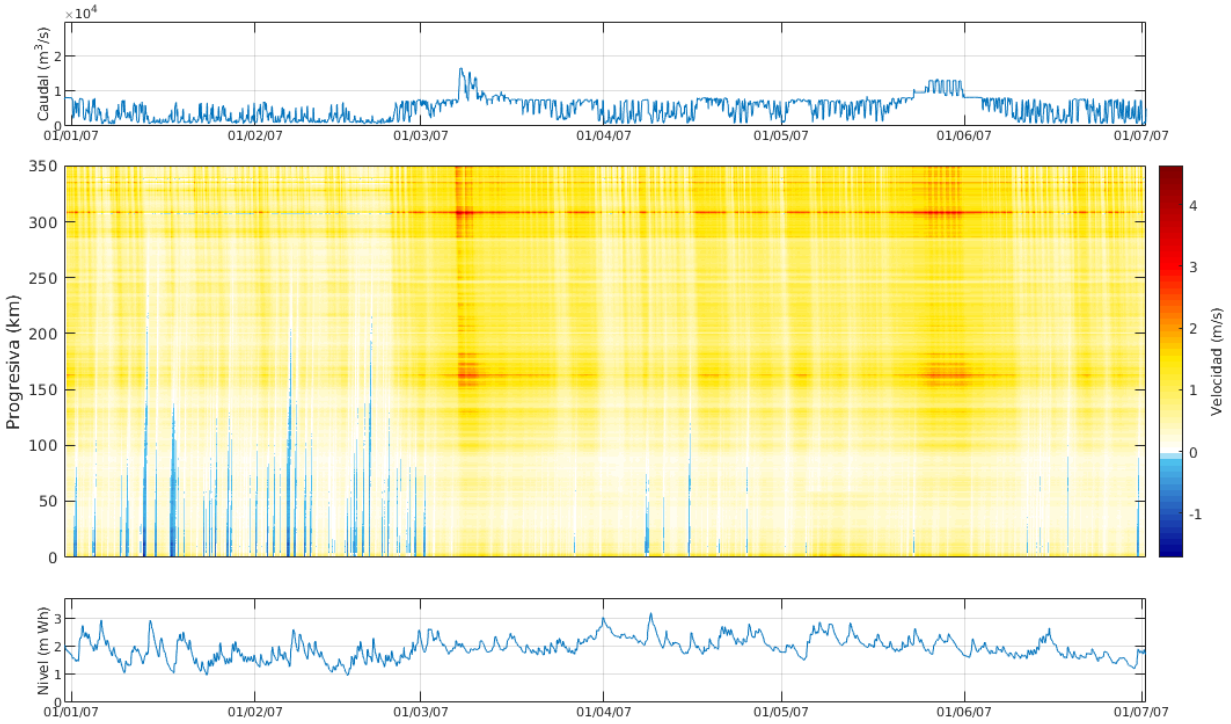


Figura 6.41: Módulo de velocidad con signo, primer semestre de 2007. Arriba: caudal erogado por Salto Grande; centro: módulo de velocidad con signo; abajo: nivel en Nueva Palmira

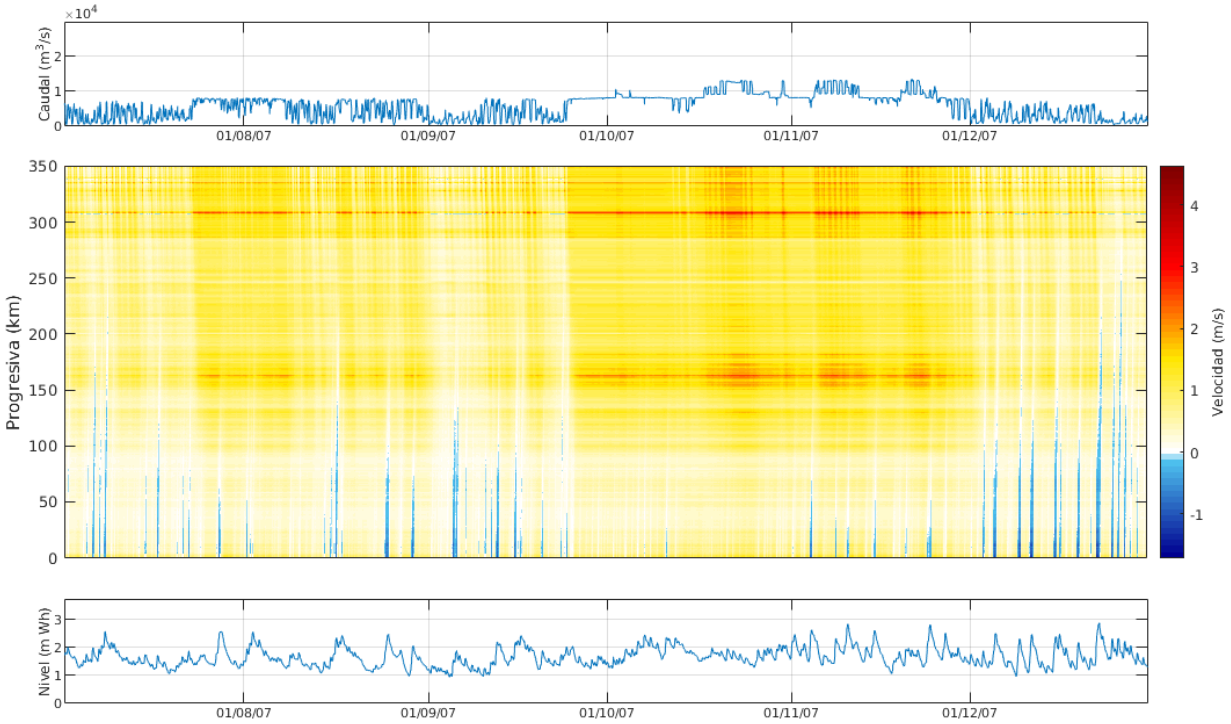


Figura 6.42: Módulo de velocidad con signo, segundo semestre de 2007. Arriba: caudal erogado por Salto Grande; centro: módulo de velocidad con signo; abajo: nivel en Nueva Palmira

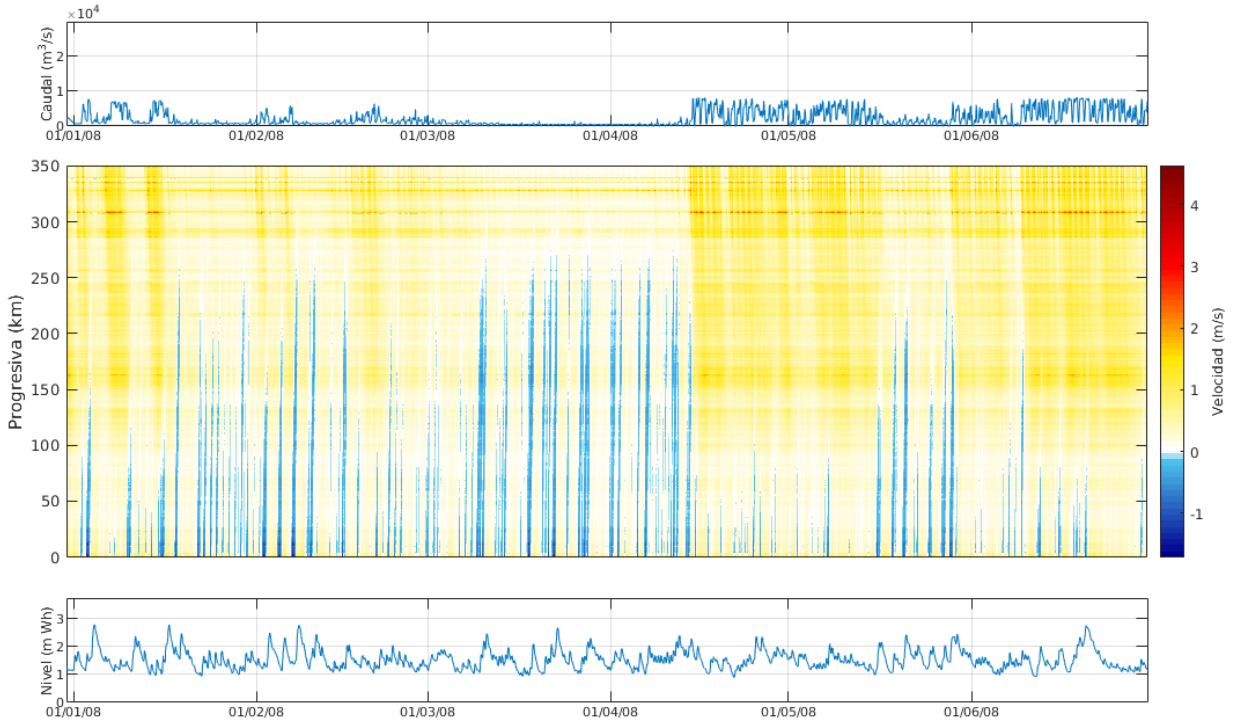


Figura 6.43: Módulo de velocidad con signo, primer semestre de 2008. Arriba: caudal erogado por Salto Grande; centro: módulo de velocidad con signo; abajo: nivel en Nueva Palmira

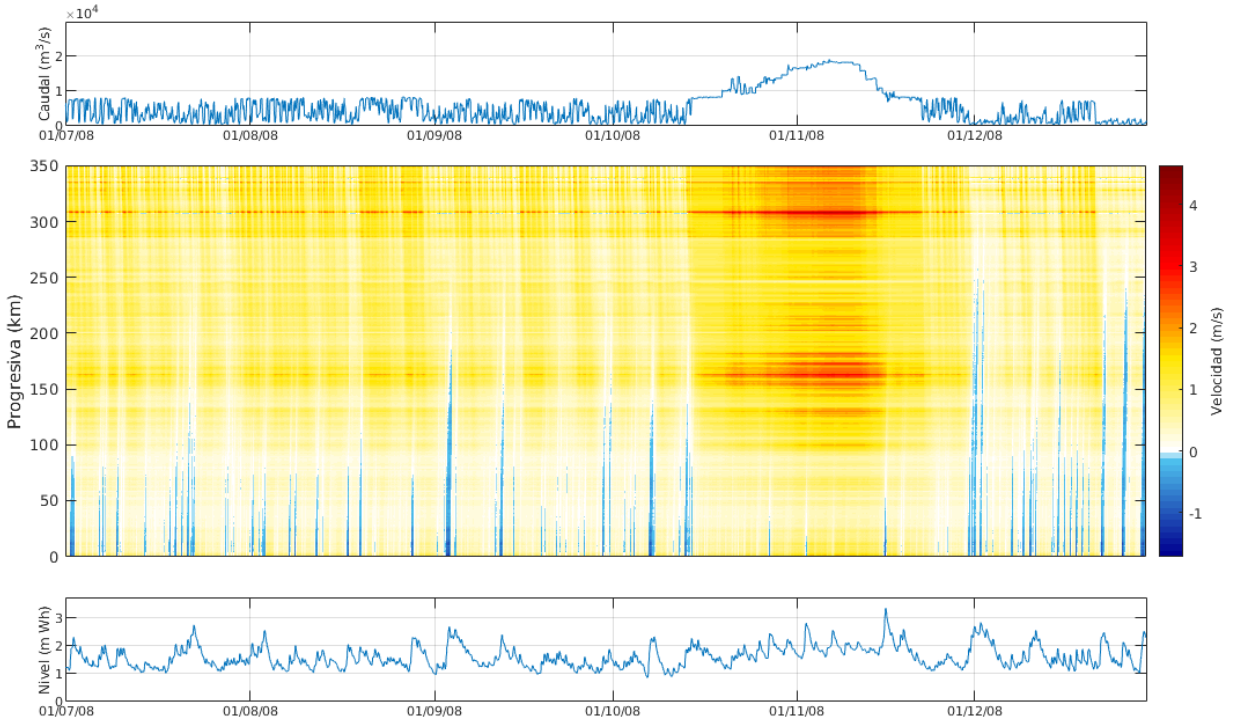


Figura 6.44: Módulo de velocidad con signo, segundo semestre de 2008. Arriba: caudal erogado por Salto Grande; centro: módulo de velocidad con signo; abajo: nivel en Nueva Palmira

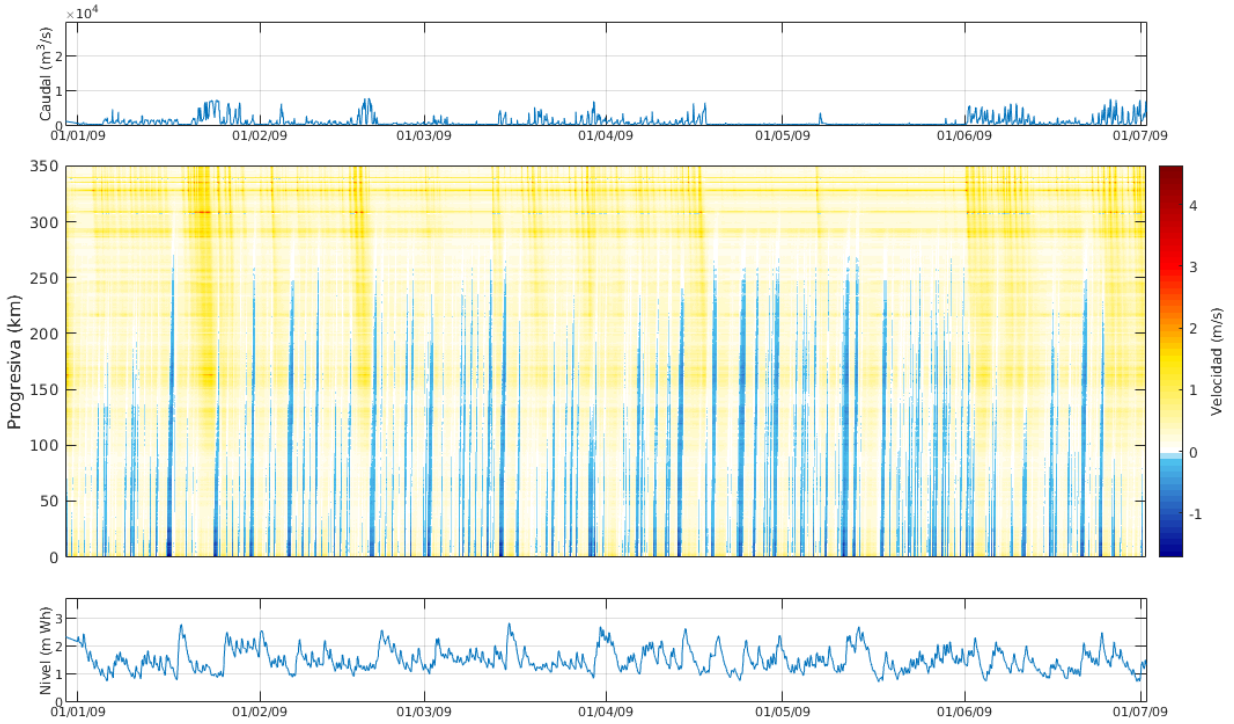


Figura 6.45: Módulo de velocidad con signo, primer semestre de 2009. Arriba: caudal erogado por Salto Grande; centro: módulo de velocidad con signo; abajo: nivel en Nueva Palmira

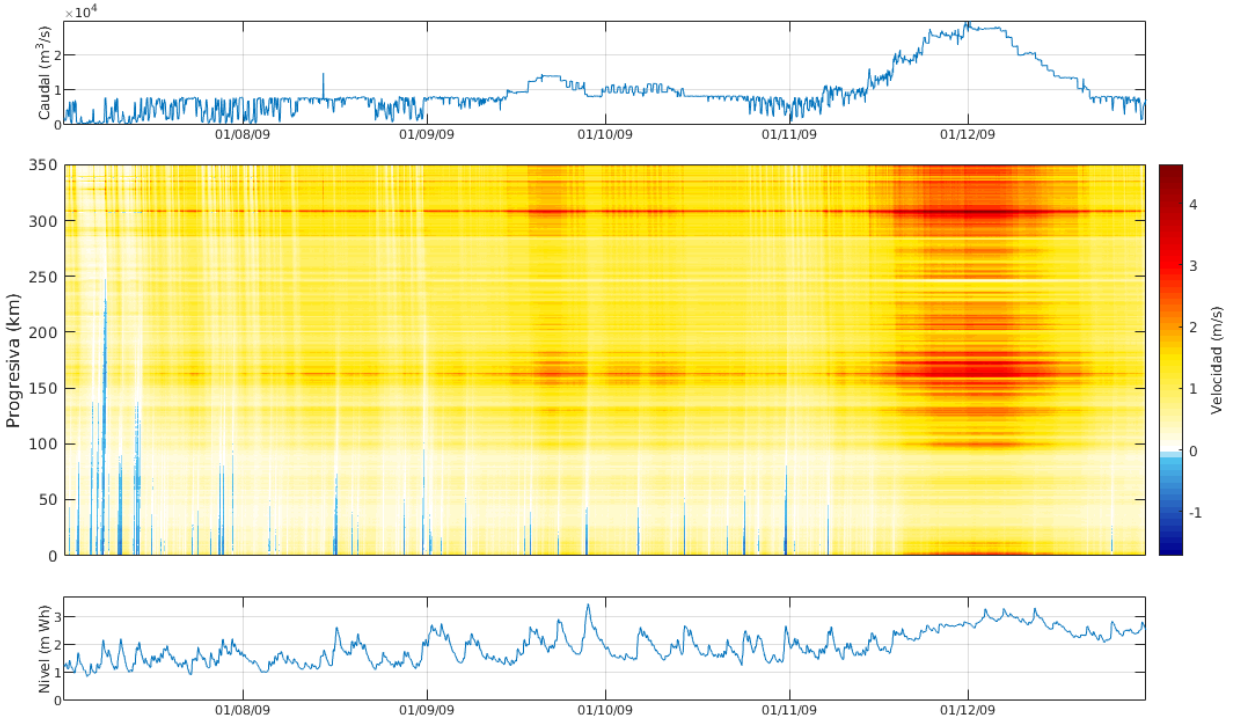


Figura 6.46: Módulo de velocidad con signo, segundo semestre de 2009. Arriba: caudal erogado por Salto Grande; centro: módulo de velocidad con signo; abajo: nivel en Nueva Palmira

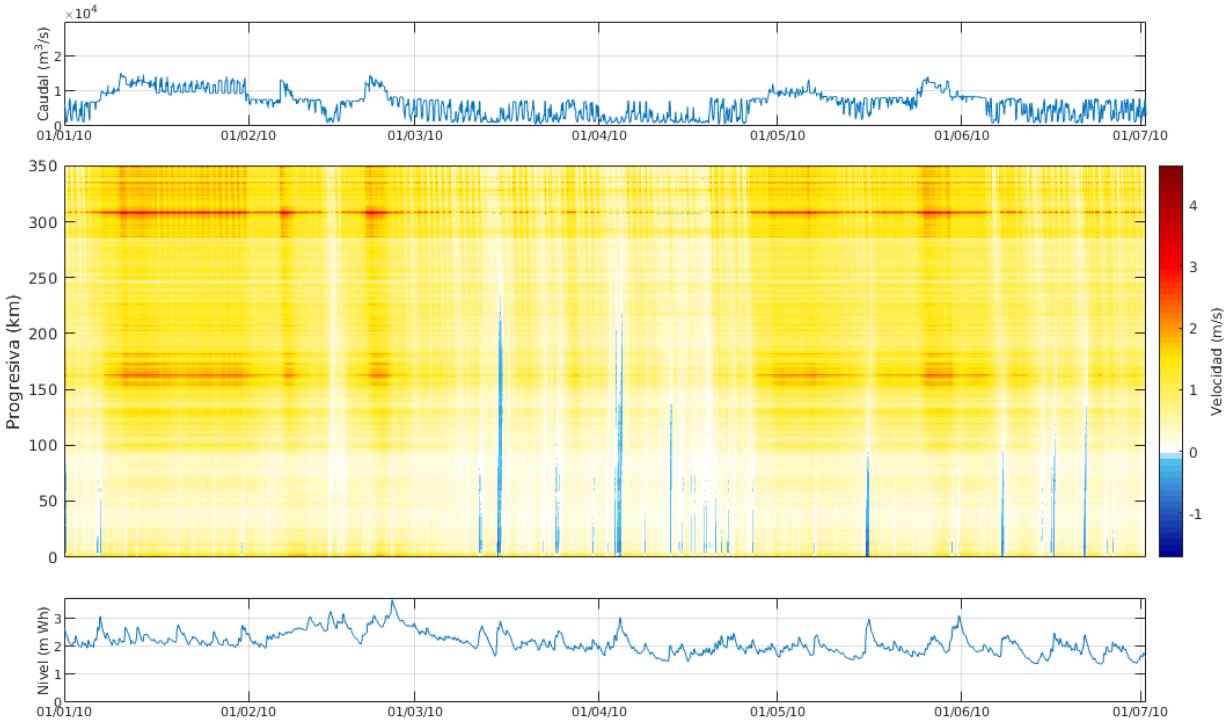


Figura 6.47: Módulo de velocidad con signo, primer semestre de 2010. Arriba: caudal erogado por Salto Grande; centro: módulo de velocidad con signo; abajo: nivel en Nueva Palmira

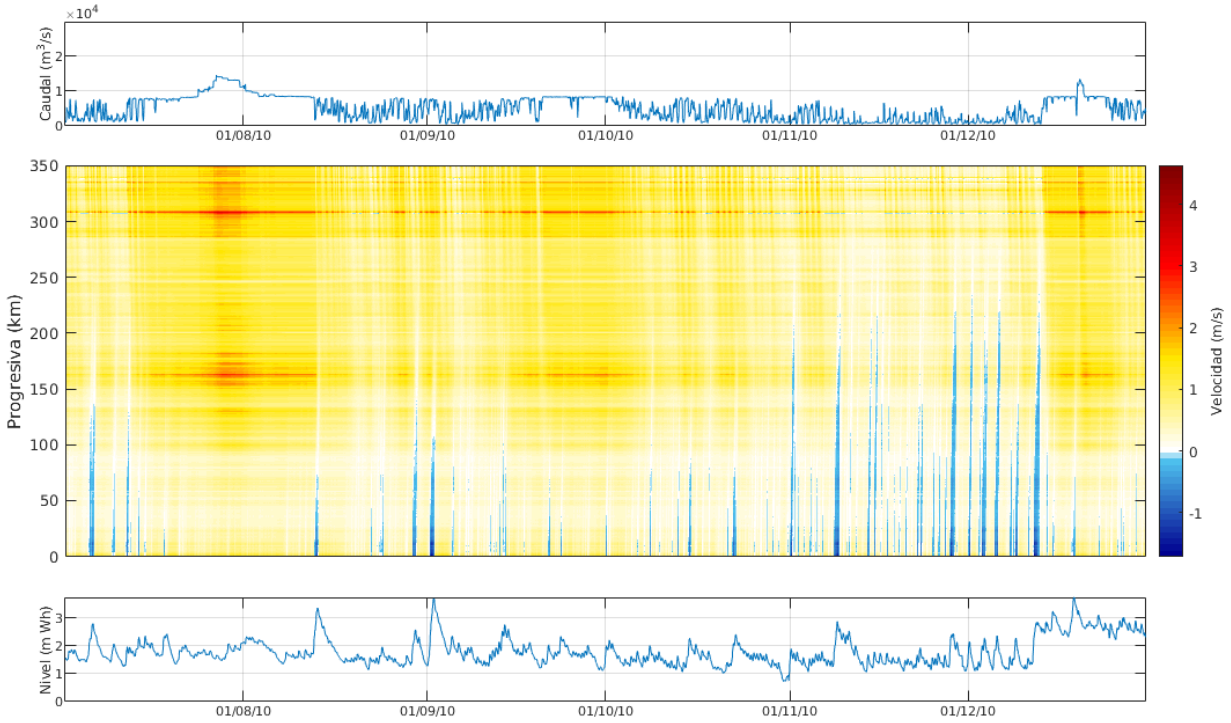


Figura 6.48: Módulo de velocidad con signo, segundo semestre de 2010. Arriba: caudal erogado por Salto Grande; centro: módulo de velocidad con signo; abajo: nivel en Nueva Palmira

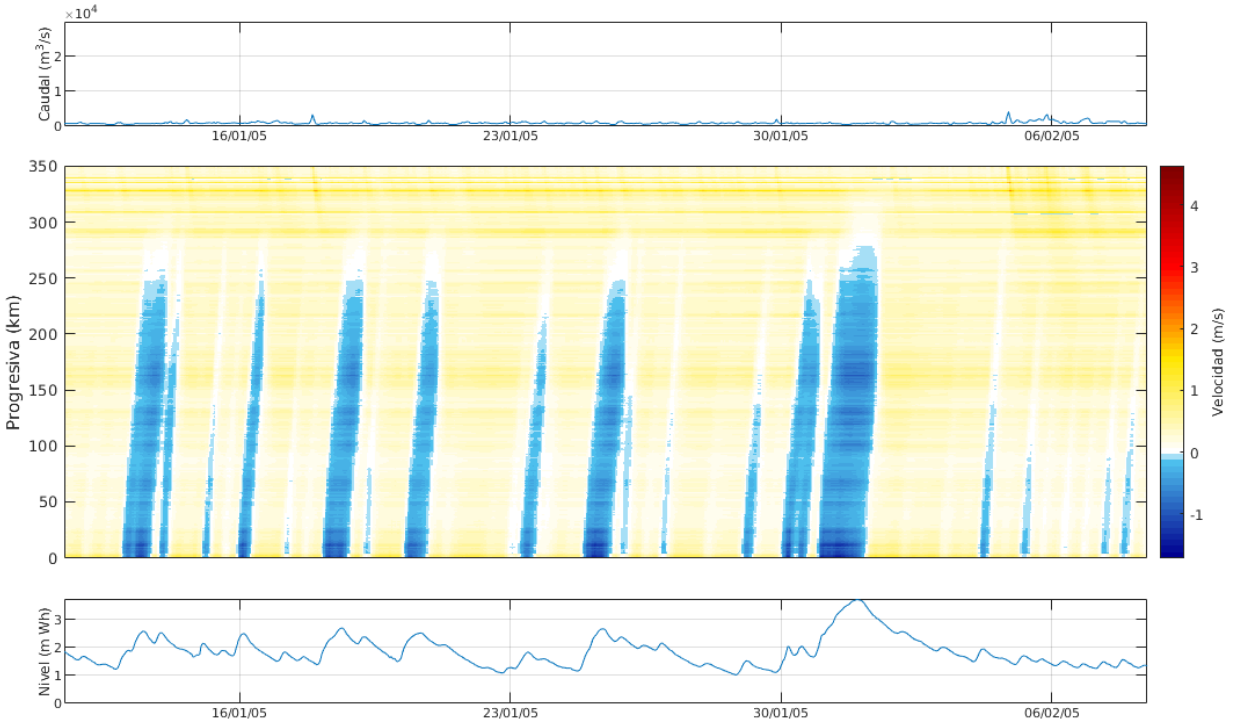


Figura 6.49: Acercamiento a lapso de 25 días de módulo de la velocidad con signo, en momento de caudales bajos en Salto Grande.

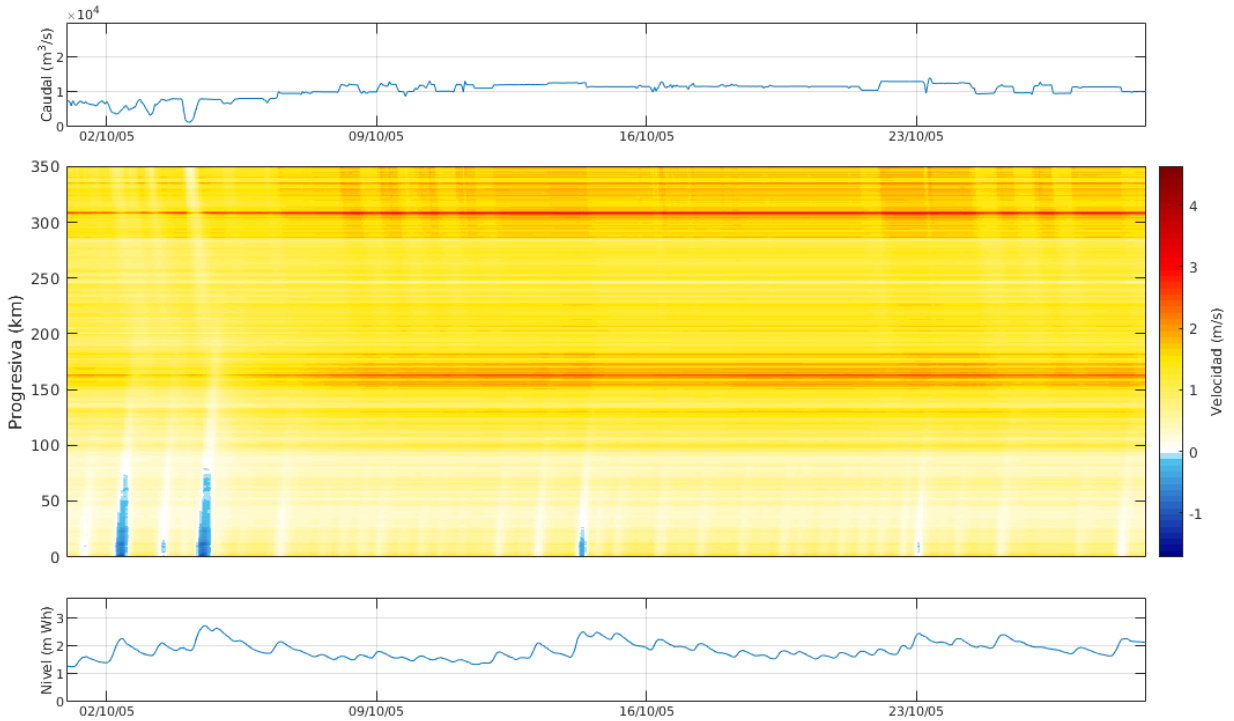


Figura 6.50: Acercamiento a lapso de 25 días de módulo de la velocidad con signo, en momento de caudales altos en Salto Grande.

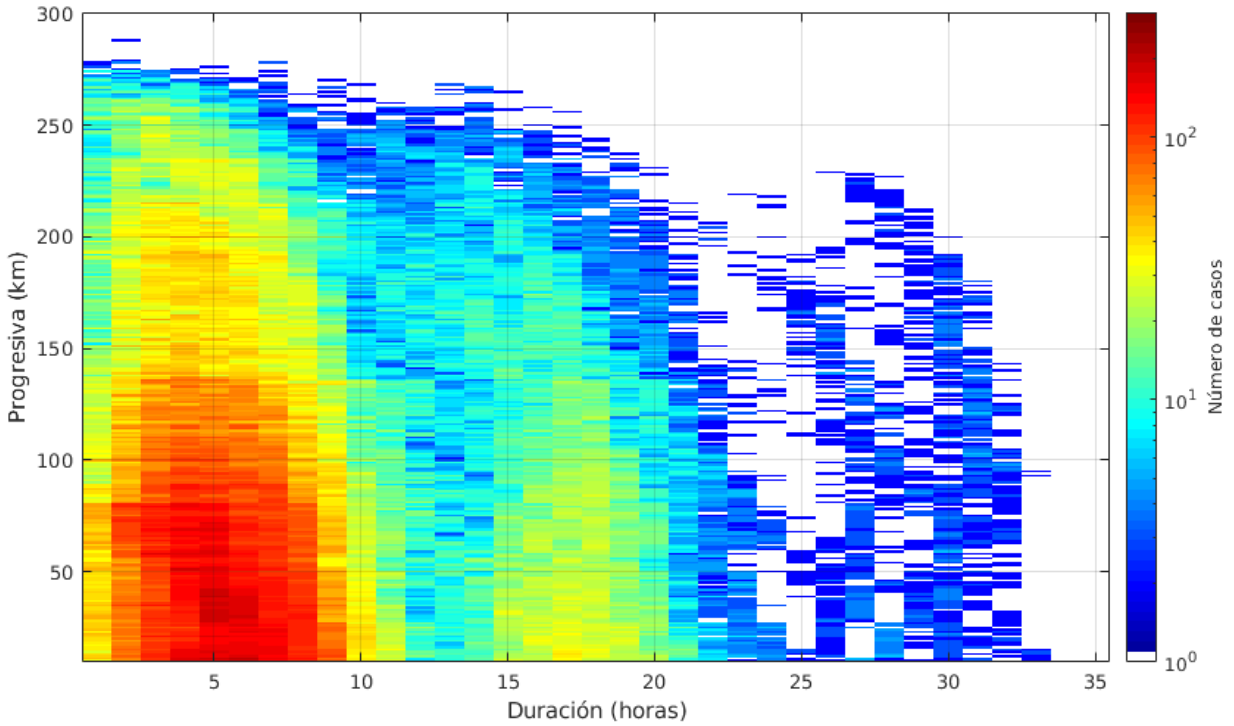


Figura 6.51: Distribución espacial sobre el eje del canal de número de ocurrencias de inversión de flujo según su duración (gradación de colores en escala logarítmica).

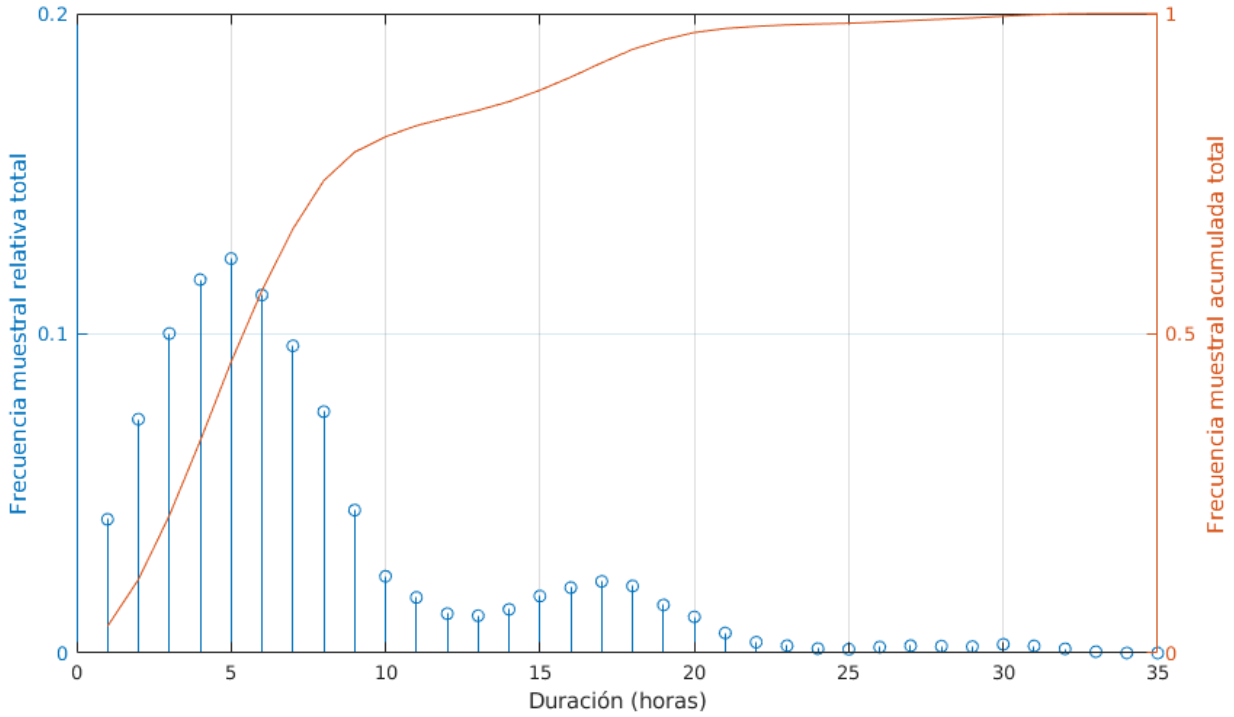


Figura 6.52: Frecuencia relativa y acumulada de ocurrencia de duraciones de inversión de flujo en los puntos de extracción de datos hasta la progresiva 300 km inclusive (ejes vertical izquierdo y derecho, respectivamente). Las categorías para el conteo de casos son 40, con un ancho de 1 hora, igual al paso temporal de los datos.

Se explora la ocurrencia conjunta entre la duración de los eventos y sus velocidades promedio y máxima en cada progresiva, mostradas en las figuras 6.54 y 6.55, donde se puede apreciar que los eventos de menor duración presentan las menores velocidades medias, y que la velocidad media mínima es creciente con la duración del evento, hasta duraciones de 24 horas aproximadamente, por encima de la cual la relación se vuelve más bien constante, esto es, eventos de mayor duración no necesariamente implican velocidades medias mínimas mayores. Para duraciones inferiores a las 10 horas se tiene una relación promedio creciente entre esta y la velocidad media del evento, observándose las mayores velocidades para eventos de 7 a 8 horas de duración. Para eventos con duración superior a las 13 horas, la relación es un poco más difusa, registrándose las mayores velocidades para duraciones de entre 17 a 18 horas, con un máximo local de ocurrencias alrededor de eventos de 17 horas de duración y 0,2 m/s de velocidad media. Para eventos de duración superior a las 24 horas, los cuales presentan menor cantidad de ocurrencias, se tiene que la mayoría se encuentran en el rango de 25 a 32 horas de duración y 0,15 a 0,30 m/s aproximadamente. El mismo comportamiento se observa para las velocidades máximas, presentando evidentemente valores de velocidad mayores, lo cual se puede apreciar en la figura 6.55.

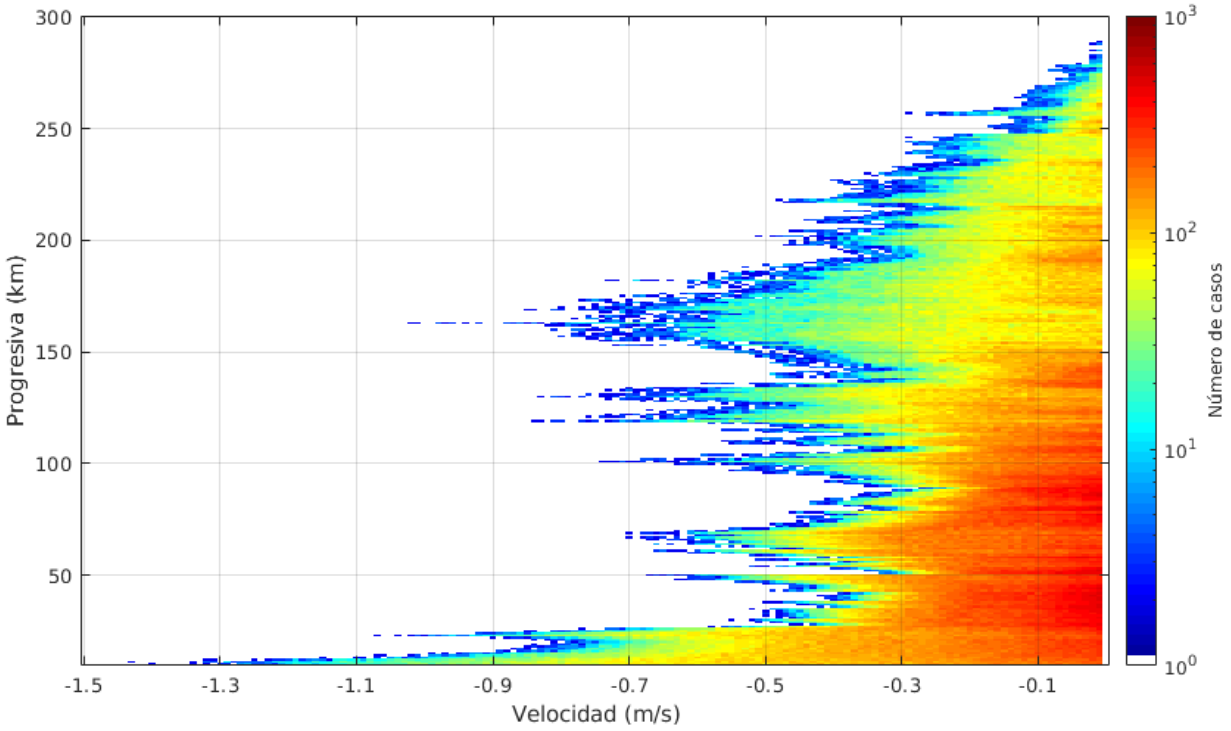


Figura 6.53: Distribución espacial sobre el eje del canal de número de ocurrencias de inversión de flujo según su velocidad (gradación de colores en escala logarítmica).

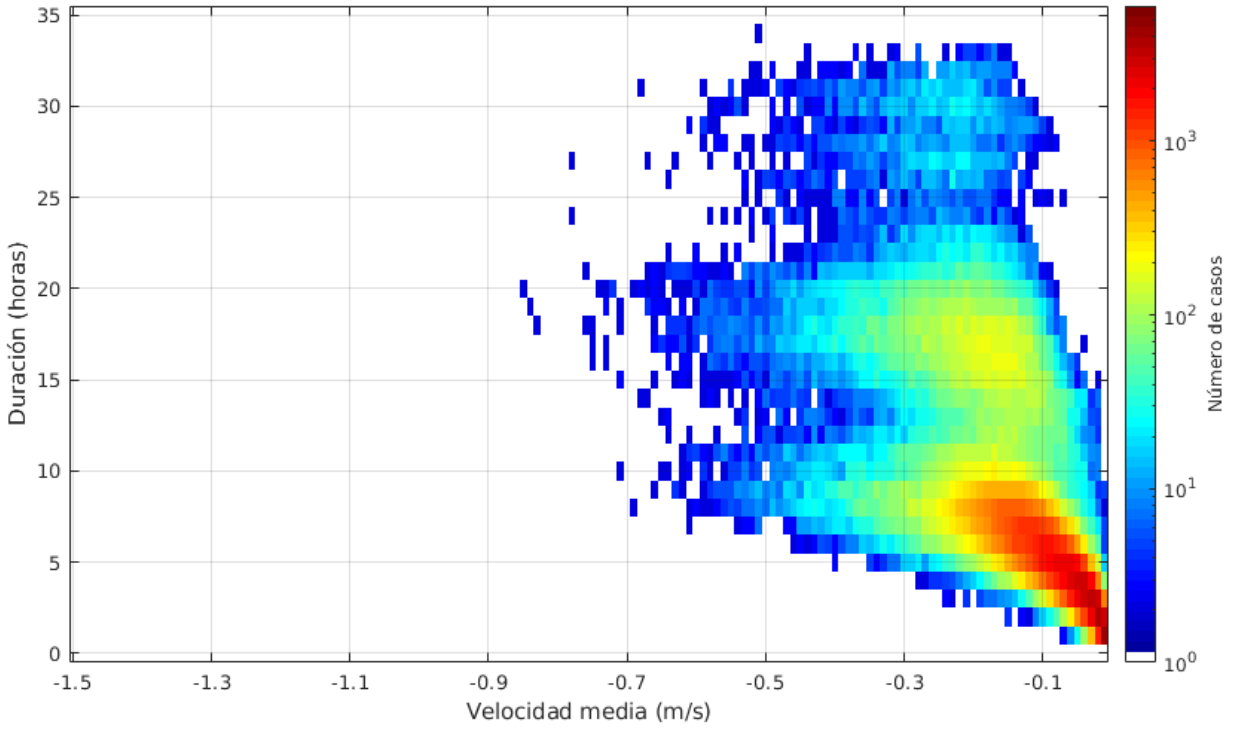


Figura 6.54: Ocurrencia conjunta de duración de evento de inversión de flujo y velocidad media del evento para todos los puntos de extracción de datos analizados (gradación de colores en escala logarítmica).

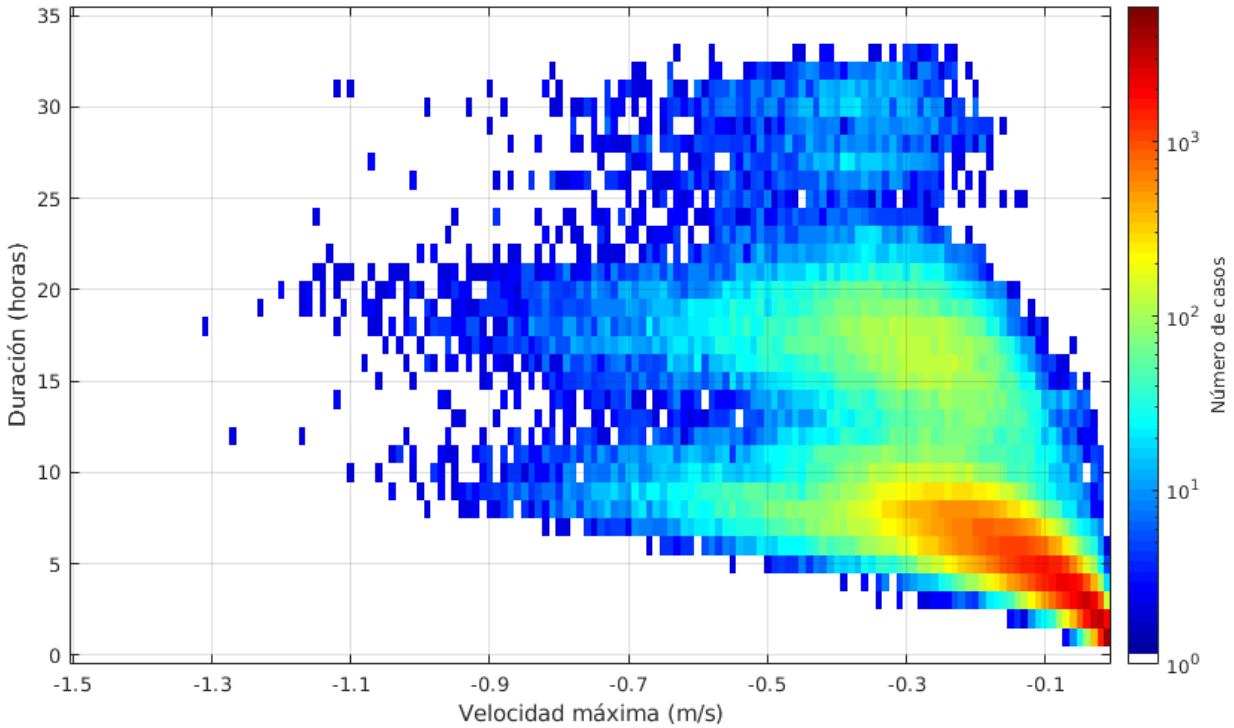


Figura 6.55: Ocurrencia conjunta de duración de evento de inversión de flujo y velocidad máxima del evento para todos los puntos de extracción de datos analizados (gradación de colores en escala logarítmica).

El análisis anterior agrega los datos obtenidos en cada progresiva, sin tomar en cuenta si estos corresponden o no a un mismo evento, por lo que no permite analizar la evolución de un evento individual a medida que éste se propaga aguas arriba. Con el objetivo de realizar un análisis detallado de cómo es la propagación de los eventos de inversión de flujo se realiza un nuevo cálculo en el cual se separan las inversiones de flujo en eventos individuales, considerando el signo de la velocidad presentada en las figuras 6.35 a 6.48, y los datos entre las progresivas 10 km y 300 km, de modo de dejar de lado la zona del modelo influenciada por la condición de contorno en caudales del Paraná Bravo, así como la zona Norte donde no se observan inversiones de flujo. Tomando el signo de la velocidad, se genera una matriz binaria (en el sentido de que sus elementos toman únicamente dos valores posibles), con valor -1 para signo negativo y 0 para signo positivo, de la cual se presenta un acercamiento para un lapso de tiempo de 20 días de duración en la figura 6.56. A esta matriz se le aplica un algoritmo de separación de cuencas, que la divide en regiones de acuerdo a la cuenca en la que se encuentre, obteniendo el resultado mostrado en la figura 6.57.

Dado que se busca que cada cuenca identificada corresponda a un único evento de inversión de flujo, lo cual no es el caso de lo mostrado en la figura anterior, se procede a hacer un filtrado de los eventos. Para esto se toman en cuenta los siguientes criterios: alguno de los bordes de la cuenca debe encontrarse en el km 10; alguna de las celdas del km 10 debe contener un valor igual a -1 (esto asegura que la cuenca delimitada corresponda a un evento de inversión que se origina en el borde inferior); y, el evento de inversión de flujo debe extenderse más allá de la progresiva 20 km (se considera una longitud mínima de evento de 10 km). Se descartan las cuencas que no cumplan estos criterios, esto es, se les asigna valor nulo a sus celdas, y se vuelve a aplicar el algoritmo de separación de cuencas. Se aplica nuevamente el criterio de filtrado de eventos, ya que se observa que el algoritmo identifica algunas cuencas que no cumplen con lo deseado, y se aplica por tercera vez el algoritmo para obtener el resultado final, que se muestra en la figura 6.58. Cabe destacar que los criterios de filtrado aplicados hacen que los eventos de inversión de flujo que presentan discontinuidades en su propagación río arriba se vean truncados, quedando únicamente su tramo con signo de velocidad negativa continua, según se puede ver comparando las figuras 6.57 y 6.58.

Aplicando los criterios anteriores se identifican en total 1.390 eventos de inversión de flujo. Para cada uno de ellos se cuantifica la duración en cada progresiva, así como la velocidad media y velocidad máxima, y hasta qué progresiva se adentra. Posteriormente se agrupan de acuerdo a su duración en la progresiva 10 km (de ahora en más “duración inicial”), en intervalos de a 1 hora, teniendo eventos de duración máxima de 34 horas.

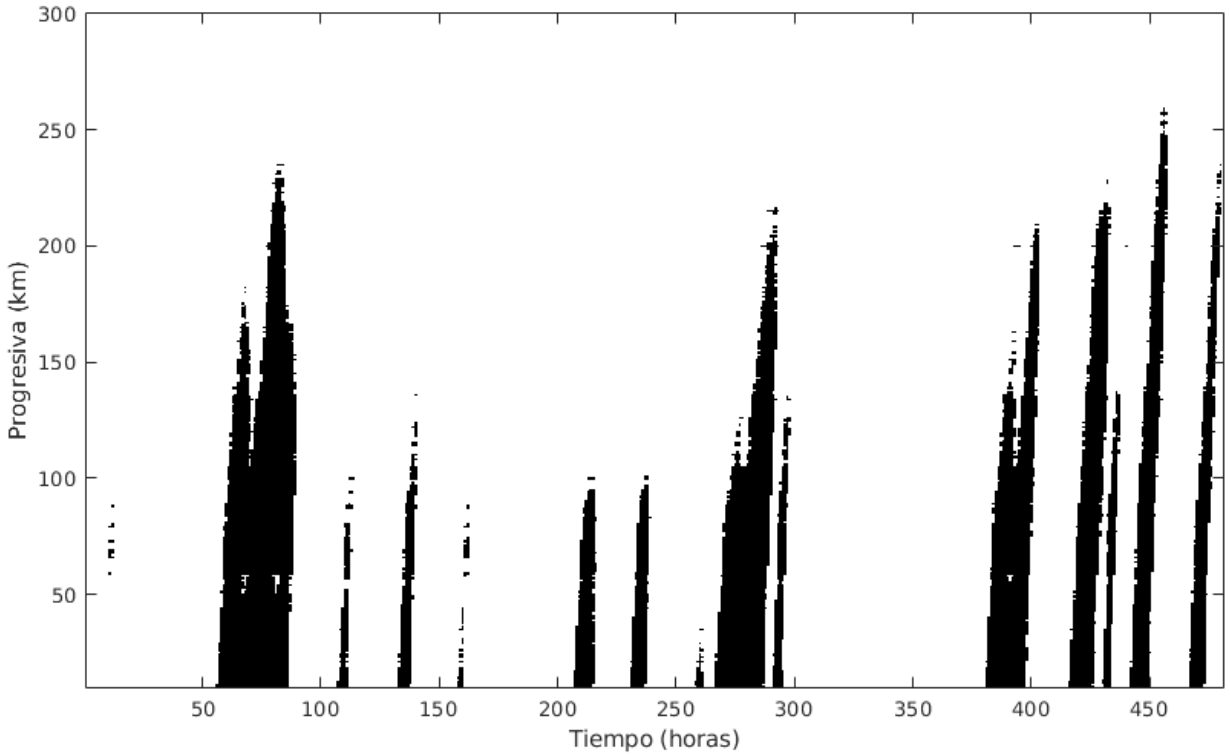


Figura 6.56: Representación gráfica de matriz de signo de velocidad (en negro se indica el signo negativo y en blanco el positivo).

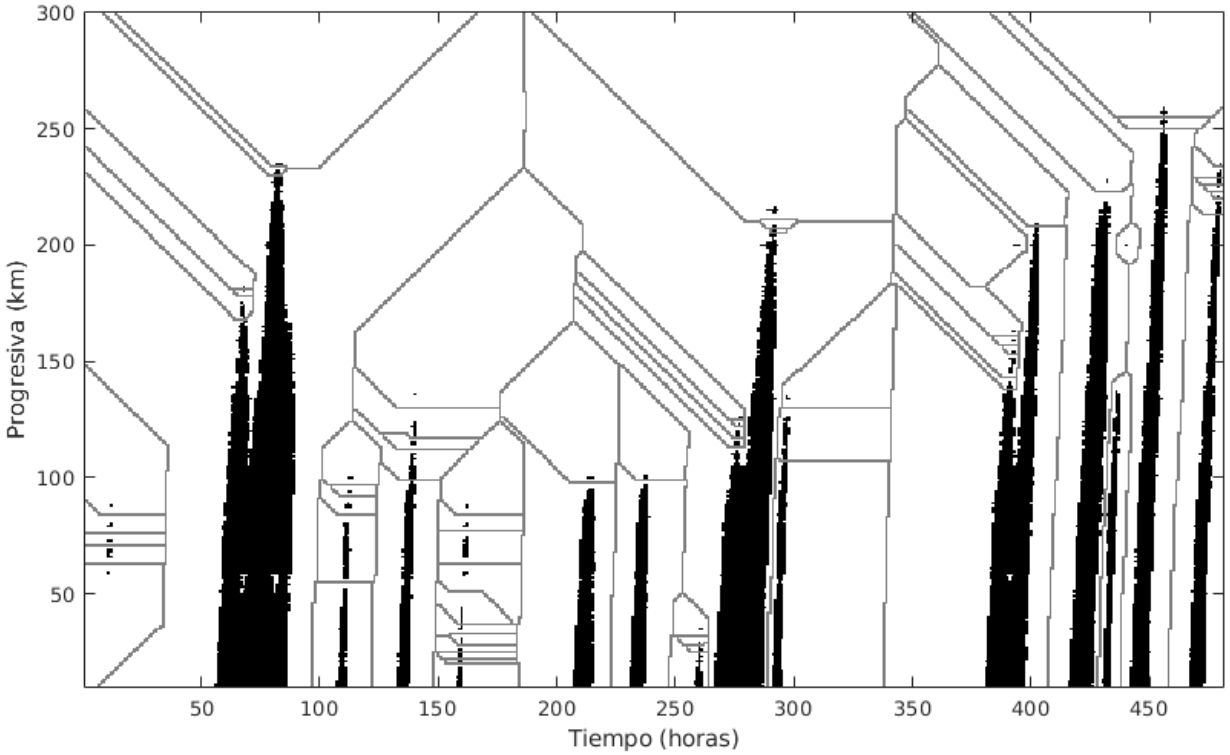


Figura 6.57: Separación de matriz de signo de velocidad en cuencas (el límite entre las cuencas se indica en gris).

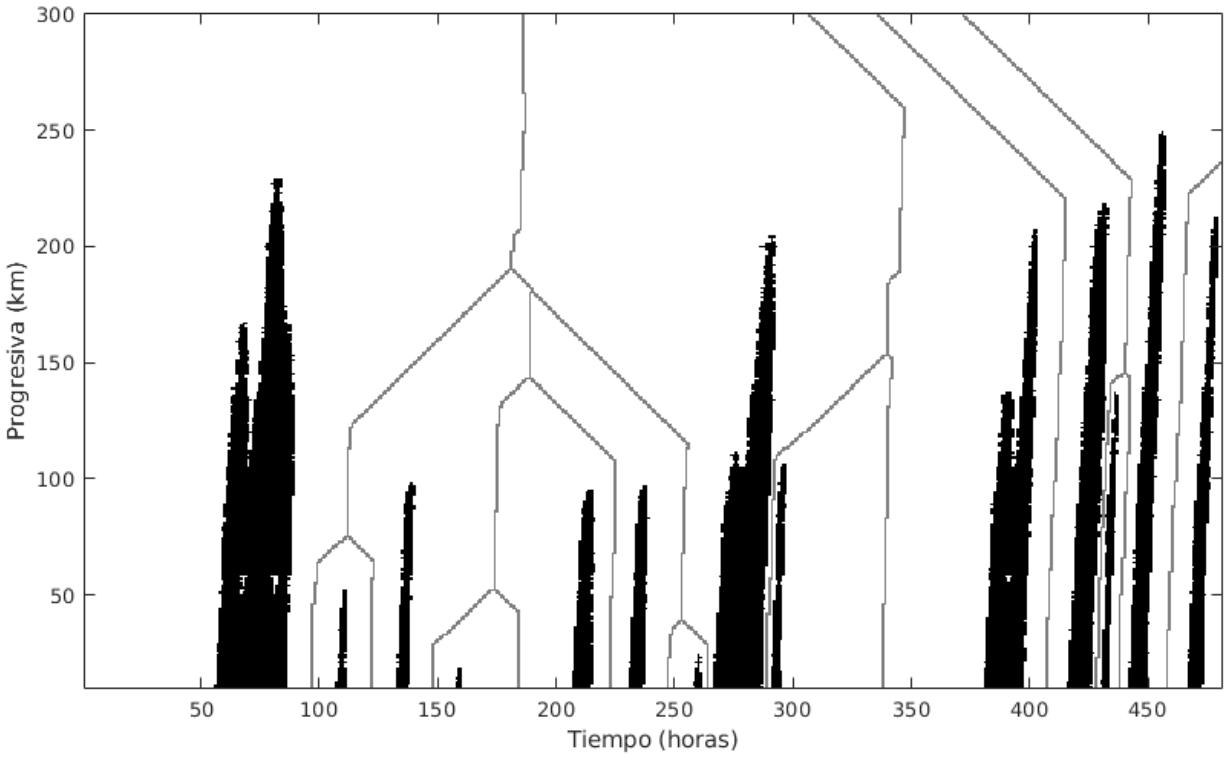


Figura 6.58: Separación de matriz de signo de velocidad filtrada en cuencas (el límite entre las cuencas se indica en gris).

Esta agrupación de eventos permite analizar la ocurrencia conjunta de la progresiva máxima que alcanzan en función de su duración inicial, lo que se presenta en la figura 6.59, donde se cuenta el número de casos de ocurrencia conjunta en celdas de 1 hora de duración y 10 km de longitud, centradas en las progresivas múltiplo de 10. Si se observa la envolvente inferior de la nube de puntos, se tiene que a medida que incrementa la duración inicial del evento, también aumenta el valor de la progresiva máxima. Si se observa ahora la envolvente superior, se tiene también una relación positiva entre duración inicial y progresiva máxima, hasta que se llega a una duración inicial de 7 horas, a partir de la cual el incremento del valor de la duración no hace que aumente la progresiva máxima. La mayor frecuencia de ocurrencia se da para eventos de 4 horas de duración inicial y 50 km de progresiva máxima.

Interesa además relacionar la distribución conjunta anterior con las condiciones de contorno de mayor influencia en el sistema, esto es, el caudal erogado por Salto Grande y el nivel de superficie libre registrado en Nueva Palmira. Para esto se considera para cada evento el valor máximo de nivel de superficie libre en Nueva Palmira registrado en el tiempo que dura el evento en cuestión, y el caudal medio erogado por Salto Grande en esa ventana temporal (habiendo previamente aplicado a la serie de caudales una media móvil con ventana de 24 horas hacia atrás del punto de promediación). De este modo, se generan gráficos de dispersión entre la duración inicial del evento y la progresiva máxima a la que llega, indicando en escala de colores

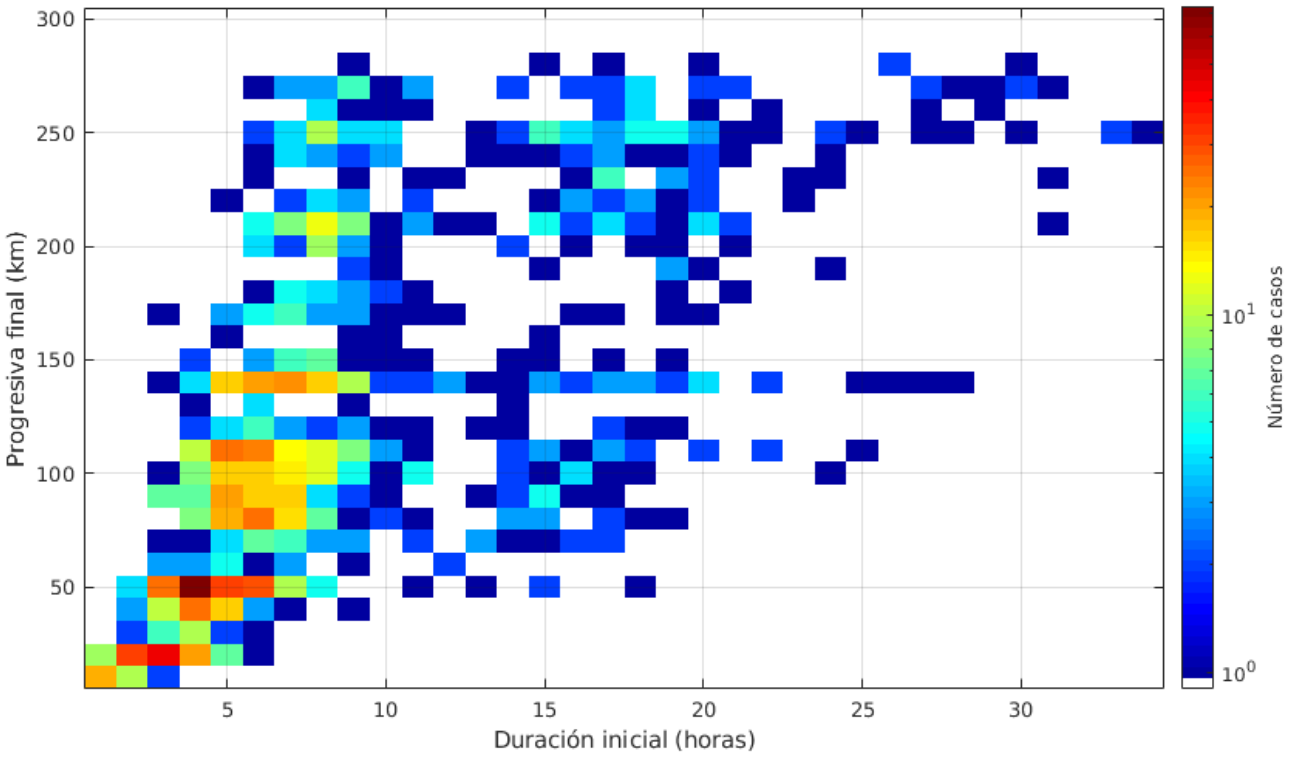


Figura 6.59: Ocurrencia conjunta de duración inicial y progresiva final alcanzada por el evento de inversión (agrupando las duraciones en pasos de 1 hora las progresivas finales en pasos de 10 km. Gradación de colores en escala logarítmica).

por un lado el nivel máximo en Nueva Palmira (figura 6.60), y por otro el caudal medio en Salto Grande (figura 6.61).

El gráfico presentado en la figura 6.60 no permite evidenciar una relación clara en la ocurrencia conjunta entre duración inicial, progresiva final y nivel máximo en Nueva Palmira, más allá de que los valores de duración superiores a 25 horas están relacionados a niveles máximos altos, por encima de los 2 m en todos los casos, mientras que las duraciones más bajas están asociadas en general a valores más bajos de nivel. Por otro lado, analizando el gráfico de la figura 6.61 que presenta la ocurrencia conjunta de duración inicial, progresiva final y caudal medio en Salto Grande, es claro que los eventos más cercanos a la envolvente superior de la nube de puntos están asociados a caudales bajos, en general inferiores a los 1.000 m^3/s, mientras que los cercanos a la envolvente inferior, están asociados a caudales superiores a los 5.000 m^3/s, encontrándose los valores más altos de caudal asociados a los eventos de duraciones menores o iguales a las 5 horas, con progresivas finales inferiores a los 50 km.

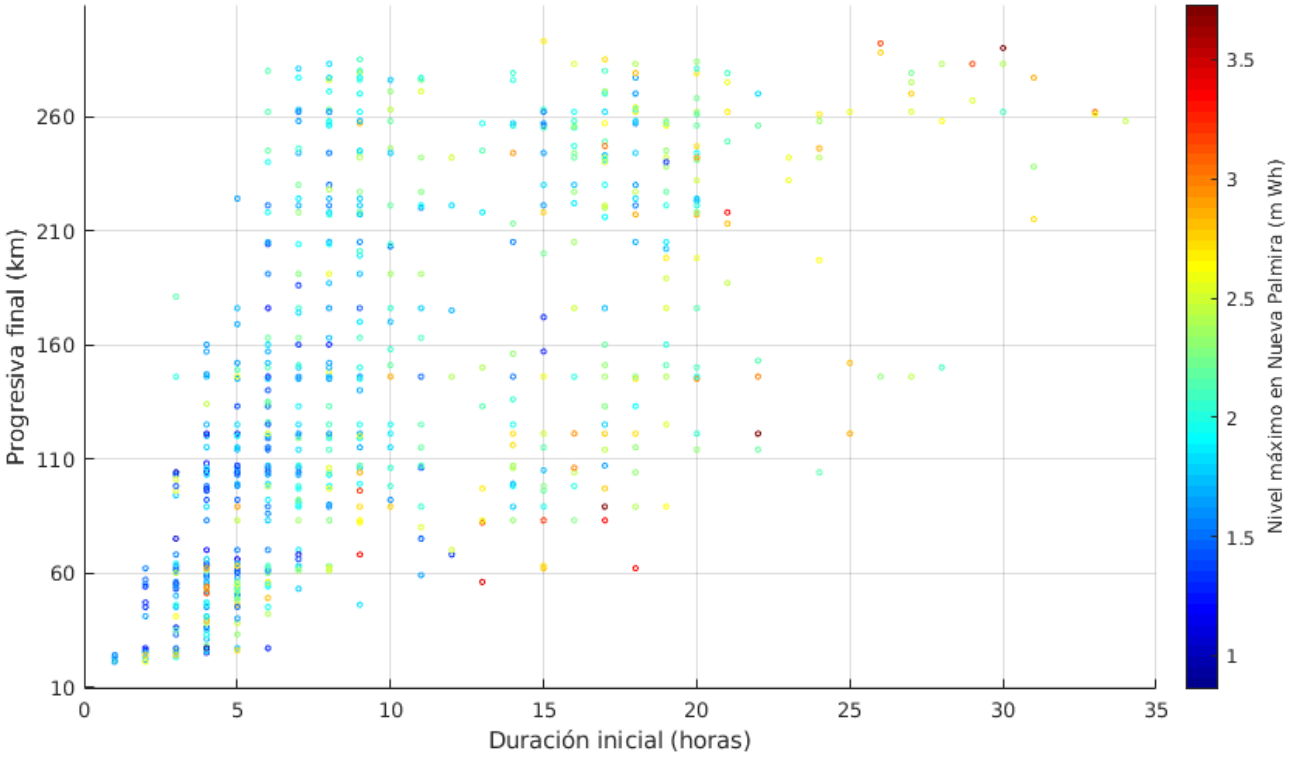


Figura 6.60: Gráfico de dispersión de progresiva final contra duración inicial, indicando en escala de colores el nivel máximo del evento en Nueva Palmira.

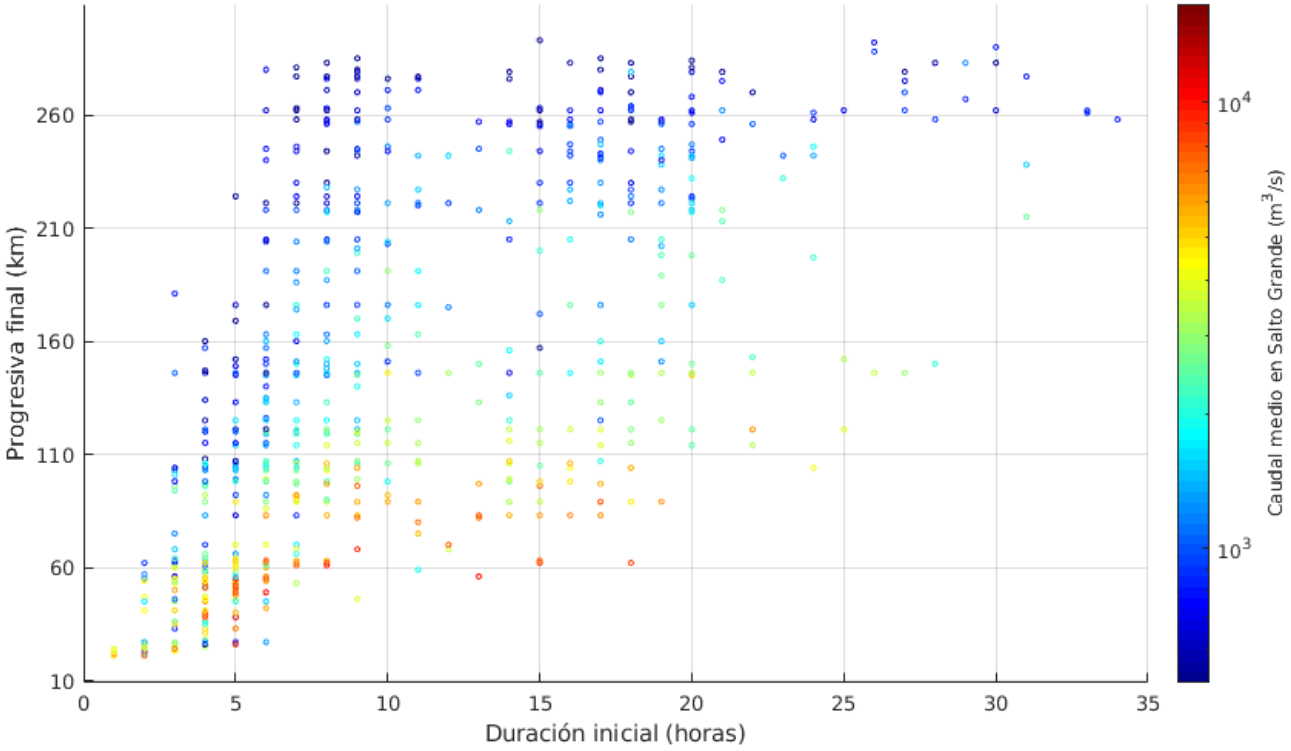


Figura 6.61: Gráfico de dispersión de progresiva final contra duración inicial, indicando en escala de colores el caudal medio erogado por Salto Grande durante el evento.

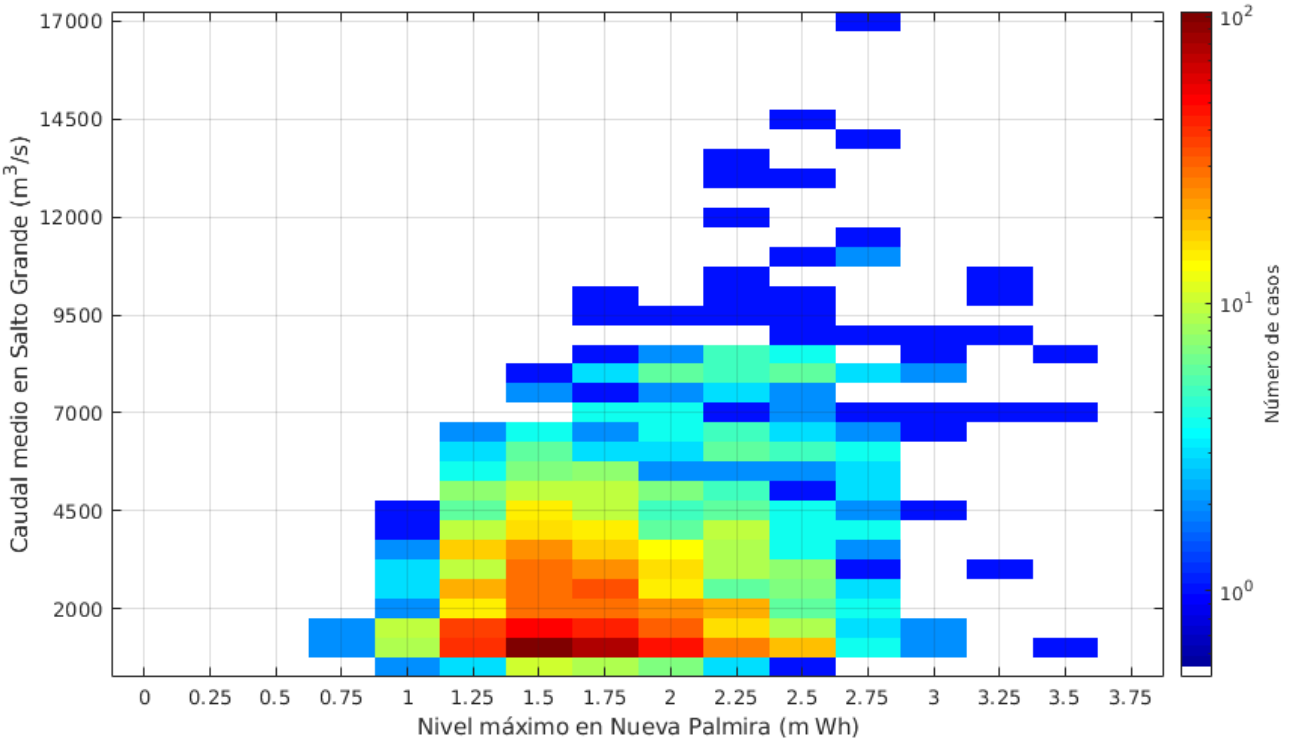


Figura 6.62: Ocurrencia conjunta de nivel máximo en Nueva Palmira y caudal medio erogado por Salto Grande por evento de inversión (agrupando los puntos en celdas de 0,25 m por 500 m^3/s . Gradación de colores en escala logarítmica).

Lo anterior se puede visualizar desde otra perspectiva analizando la ocurrencia conjunta de caudal medio erogado en Salto Grande contra nivel máximo en Nueva Palmira durante los eventos de inversión de flujo. El histograma correspondiente se presenta en la figura 6.62, en el cual se puede ver que la mayoría de los casos se encuentran alrededor del punto de 1.000 m^3/s y 1,5 m. Analizando por su parte el gráfico de dispersión correspondiente a caudales medios en Salto Grande contra niveles máximos en Nueva Palmira, con la duración inicial del evento en escala de colores, presentado en la figura 6.63, se puede ver que los eventos de duración inicial más alta están asociados a caudales bajos y niveles altos. Se puede observar asimismo que para un nivel dado, la duración inicial del evento tiende a disminuir a medida que aumenta el caudal medio de Salto Grande. Observando ahora el diagrama de dispersión con la progresiva final en escala de colores, se puede apreciar de manera muy clara que las progresivas más altas se encuentran en el rango de caudales bajos, aumentando la amplitud de este rango a medida que se incrementa el nivel máximo registrado en Nueva Palmira. Asimismo, para un nivel máximo dado, se puede observar que la progresiva final alcanzada por el evento de inversión disminuye a medida que incrementa el caudal.

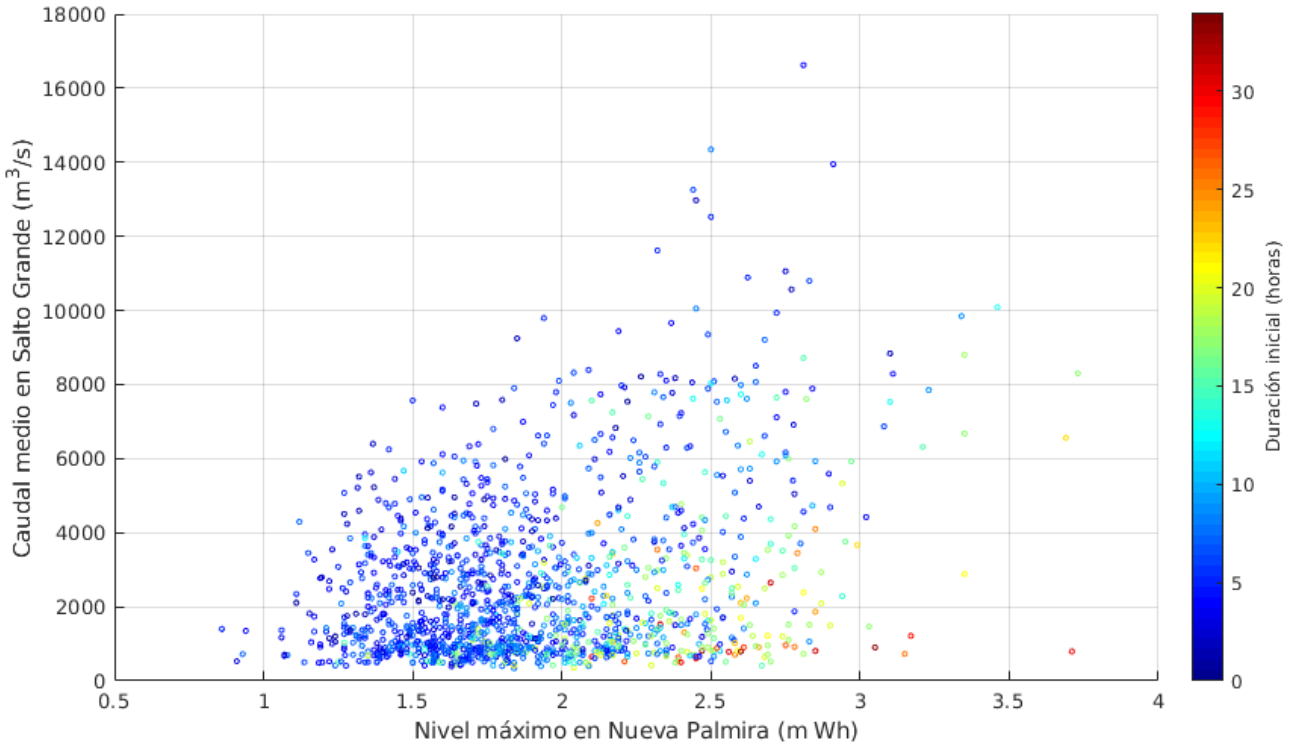


Figura 6.63: Gráfico de dispersión de caudal medio erogado por Salto Grande contra nivel máximo en Nueva Palmira, indicando en escala de colores la duración inicial del evento.

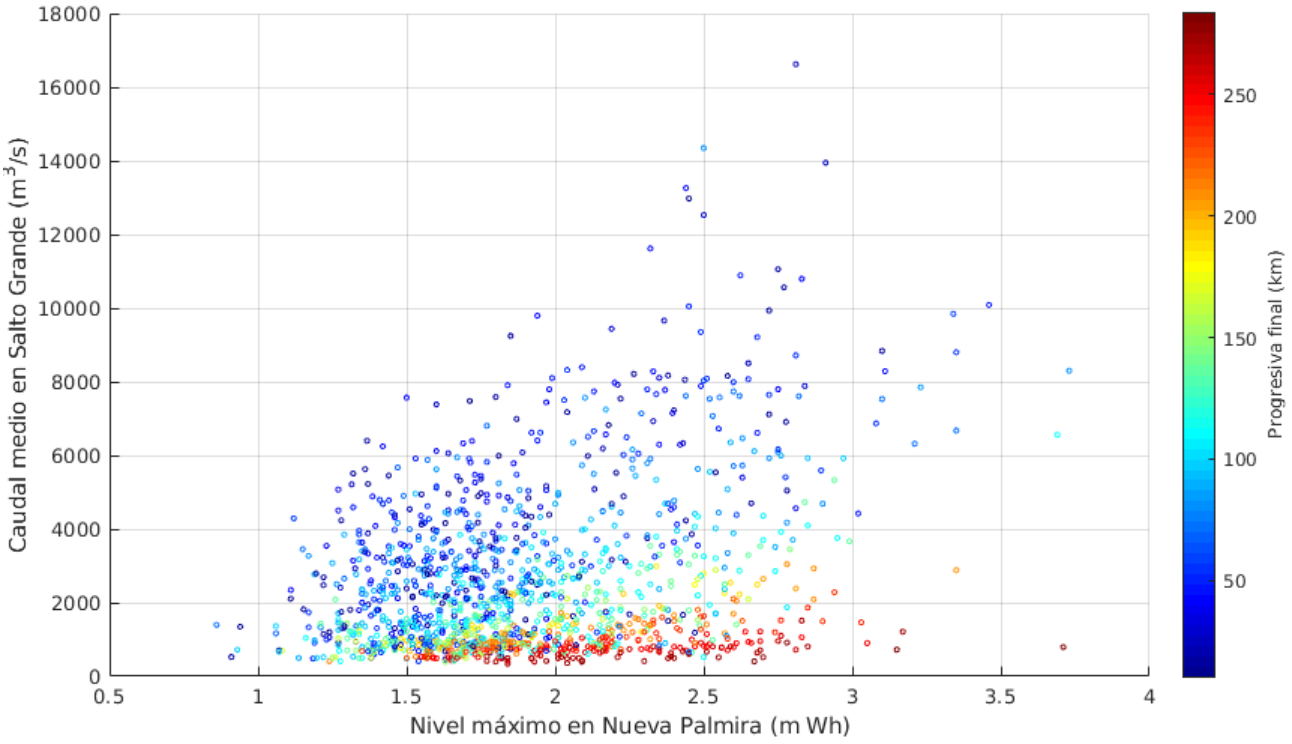


Figura 6.64: Gráfico de dispersión de caudal medio erogado por Salto Grande contra nivel máximo en Nueva Palmira, indicando en escala de colores la progresiva final del evento.

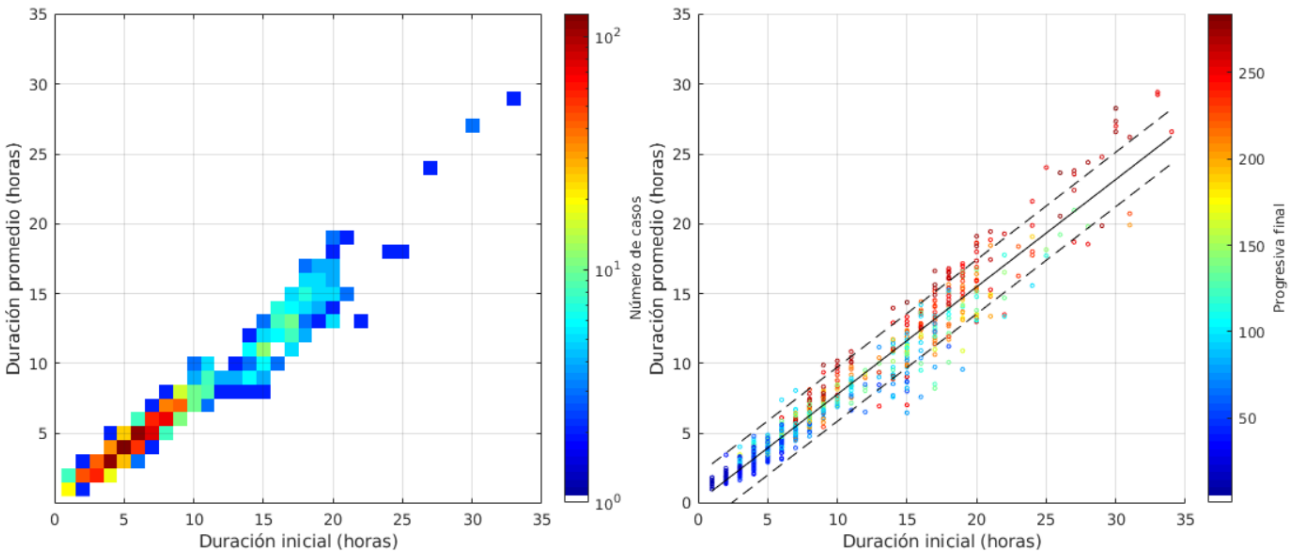


Figura 6.65: Izquierda: ocurrencia conjunta de duración inicial y duración promedio. Derecha: gráfico de dispersión de duración inicial y duración promedio, con escala de colores indicando la progresiva final hasta la que se propagó cada evento (ajuste lineal representado como una linea negra continua, con intervalos de confianza al 95 % como líneas negras discontinuas).

Se analiza por otro lado la relación entre la duración inicial de un evento y su duración promedio (cabe aclarar que el promedio se hace únicamente en las progresivas donde la duración sea distinta de cero), determinando la ocurrencia conjunta de dichos valores, lo que se presenta en el gráfico izquierdo de la figura 6.65. En este se puede ver que la mayor cantidad de ocurrencias se encuentran en el rango por debajo de las 10 horas de duración inicial, donde las celdas presentan valores de cantidad de casos un orden de magnitud superiores a las del rango entre 10 y 20 horas de duración inicial, y dos órdenes de magnitud por encima del rango de duración inicial superior a las 20 horas. En el gráfico de la derecha se muestra la nube de puntos de duración promedio contra duración inicial, indicando en escala de colores la progresiva máxima hasta la que avanza la inversión de flujo. En este se puede observar que la duración inicial y la promedio presentan una relación que puede interpretarse como lineal, cuyo ajuste arroja una pendiente de 0,77, encontrándose la mayoría de los datos por debajo de una recta de pendiente unitaria que pasa por el origen, esto es, la duración promedio de un evento suele ser menor que la duración inicial. Se observa asimismo que los eventos que se encuentran más cerca de la recta de pendiente unitaria son los que se adentran más en el río, alcanzando progresivas más altas. De esto se puede interpretar que los eventos de inversión que más se adentran en el río suelen mantener una duración uniforme en todo su trayecto.

6.5. Análisis de patrones de flujo en la zona de Fray Bentos

En esta sección se analizan los patrones de flujo en las cercanías de la ciudad de Fray Bentos, entre las progresivas 106 km y 90 km. Para esto se consideran los datos del campo de velocidad en los nodos de la grilla de cálculo ubicados dentro del polígono mostrado en la figura 6.66, que son 6.281 en total, los cuales se interpolan a una grilla uniforme de 200 m de lado, con un total de 2.355 nodos. De este modo se hace que la densidad de los nodos sea uniforme en el dominio y que por tanto las series de velocidad en cada uno de ellos tengan la misma representatividad.

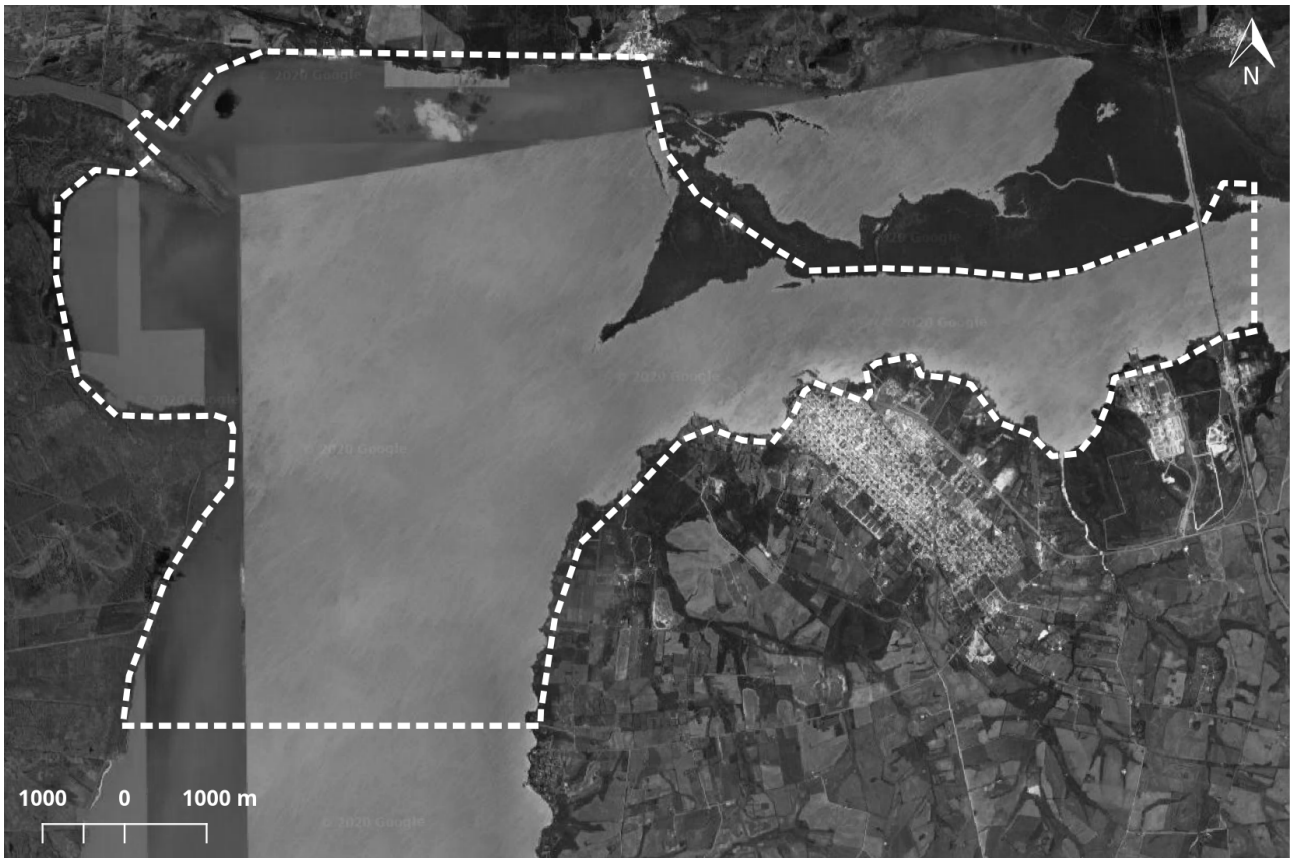


Figura 6.66: Delimitación de zona para análisis de patrones de flujo, demarcada por línea blanca puenteada.

Para determinar los patrones de flujo subyacentes se realiza un análisis de componentes principales (en adelante "PC") y funciones ortogonales empíricas (en adelante "EOF") (Wilks, 2011). Las EOF permiten determinar estructuras espaciales del campo vectorial de velocidad, que multiplicadas por las PC, las cuales corresponden a series temporales, permiten reconstruir el campo vectorial original en su variación temporal y espacial de acuerdo a la ecuación siguiente (donde N es el número total de nodos):

$$\vec{V}(x,y,t) = \sum_{i=1}^{N} PC_i(t) \times EOF_i(x,y) \tag{6.1}$$

Una vez obtenidas las PC y EOF, o "modos", se analiza qué porcentaje de la varianza explica cada uno de ellos, así como la forma de la señal de la PC correspondiente y la estructura espacial de la EOF. De este análisis surge que los primeros 4 modos explican el 99,4 % de la varianza, con el primero explicando el 97,5 %, el segundo el 1,3 %, el tercero el 0,4 % y el cuarto el 0,2 %. Para cada modo obtenido se genera un mapa de regresión lineal de la PC correspondiente (dividida entre su desviación estándar) con las señales de las componentes U y V de la velocidad en cada nodo, obteniendo así dos coeficientes angulares en cada nodo, los cuales son representados como campo vectorial manteniendo la estructura de la EOF correspondiente, pero con unidades de velocidad. Se genera asimismo un mapa de correlación entre la PC correspondiente y las señales de las componentes U y V de la velocidad (calculando el módulo de la correlación entre la i-ésima PC y las señales de U y V como $||corr(PC_i, U, V)|| = \sqrt{corr(PC_i, U)^2 + corr(PC_i, V)^2}/\sqrt{2}$), representando los valores significativamente distintos de cero con un 99 % de confianza (las áreas con valores no significativamente distintos de cero se representan como transparentes).

El primer modo obtenido explica el 97,5 % de la varianza del campo de velocidades en la zona analizada. El mapa de regresión se presenta en forma de campo vectorial en la figura 6.67, en la que se puede ver que la estructura del mismo se asemeja fuertemente al campo de velocidades medio analizado en la sección 6.2. El mapa de correlación entre la primera PC y las componentes U y V de la velocidad muestran los valores más altos en la zona del cauce y parte de la bahía donde desemboca el río Gualeguaychú. Presenta valores bajos de correlación en las bahías sobre la margen uruguaya, en las cercanías y al Este de Fray Bentos, como en la desembocadura del Gualeguaychú y en la zonas Oeste y Norte de la bahía del Ñandubaysal, principalmente sobre la costa.

Dado que se busca asociar los modos hallados con las forzantes del sistema, se hace un análisis de la correlación entre la señal de la primera PC con las señales de caudales de Salto Grande y Niveles en Nueva Palmira, principales forzantes del modelo. Las señales se comparan gráficamente, y luego se busca maximizar la correlación entre el forzante y la PC explorando distintos desfasases temporales.

La comparación gráfica entre las señales de la primera PC y el caudal erogado por Salto Grande se presentan en la figura 6.68, donde se puede evidenciar claramente la similitud entre las mismas, especialmente en momentos de caudal medio y alto, donde la señal tiene más amplitud, y más influencia en el comportamiento del campo de velocidades, en términos físicos. En la figura 6.69 se presenta el gráfico de dispersión entre las señales sin desfase temporal, el coeficiente de correlación para distintos desfases, y el gráfico de dispersión para el desfase que maximiza la correlación, el cual corresponde a -25 horas con un valor de R de Pearson de 0,856

(la primera PC se mueve 25 horas hacia atrás, o lo que es lo mismo, la señal de caudal se mueve 25 horas hacia adelante, o demora 25 horas en "llegar" hasta la zona analizada). Este último gráfico ratifica lo observado en la comparación de las señales en el tiempo, mostrando una menor dispersión para valores altos de caudales.

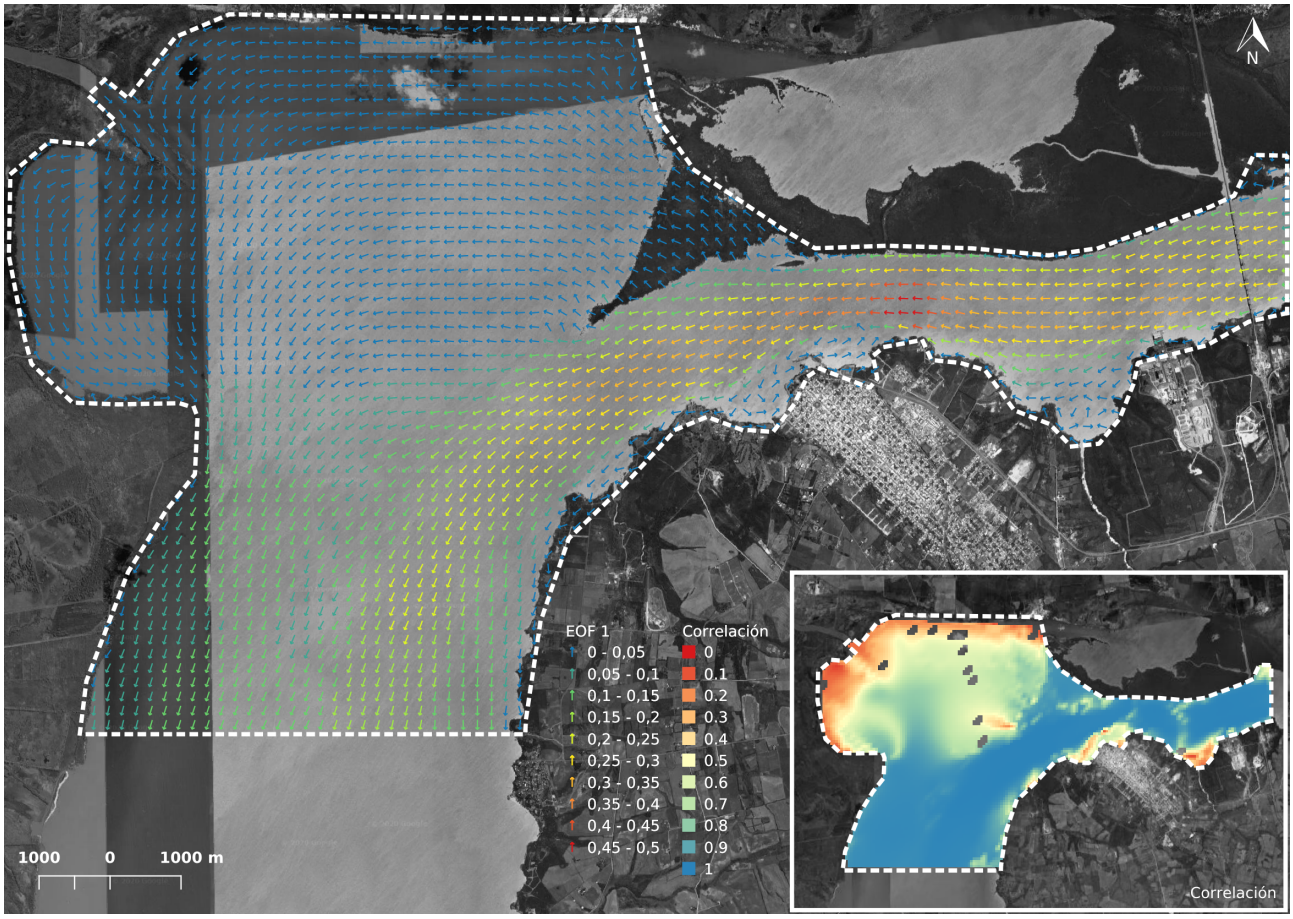


Figura 6.67: EOF asociada a la primera PC, modo que explica el 97,5 % de la varianza del campo de velocidades en el área analizada. Abajo a la derecha: mapas de correlación de la primera PC con los campos de velocidad U y V (estadísticamente significativa al 99 % de confianza).

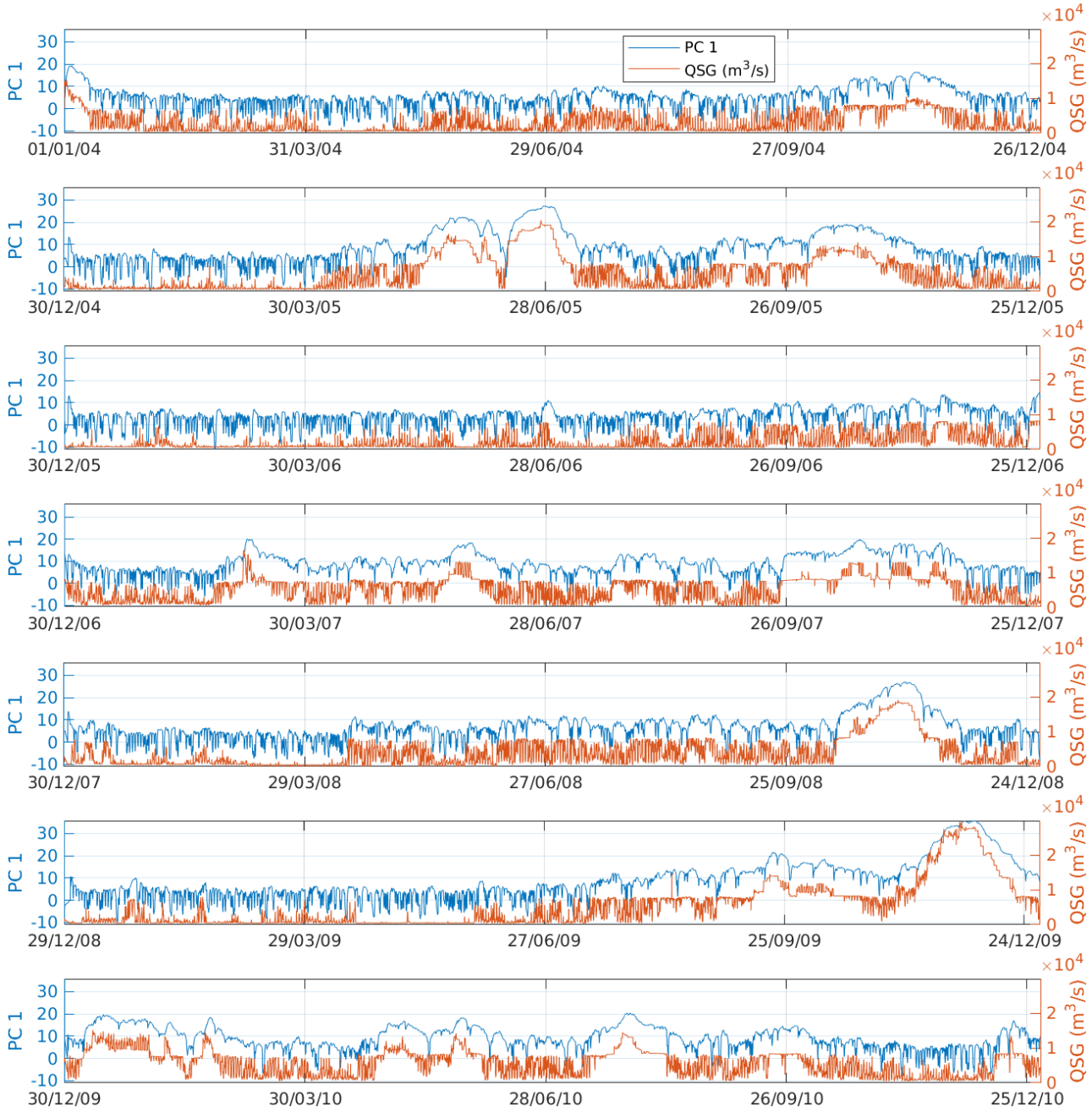


Figura 6.68: Series temporales de primera PC y caudal de Salto Grande (QSG) para comparación gráfica de las señales.

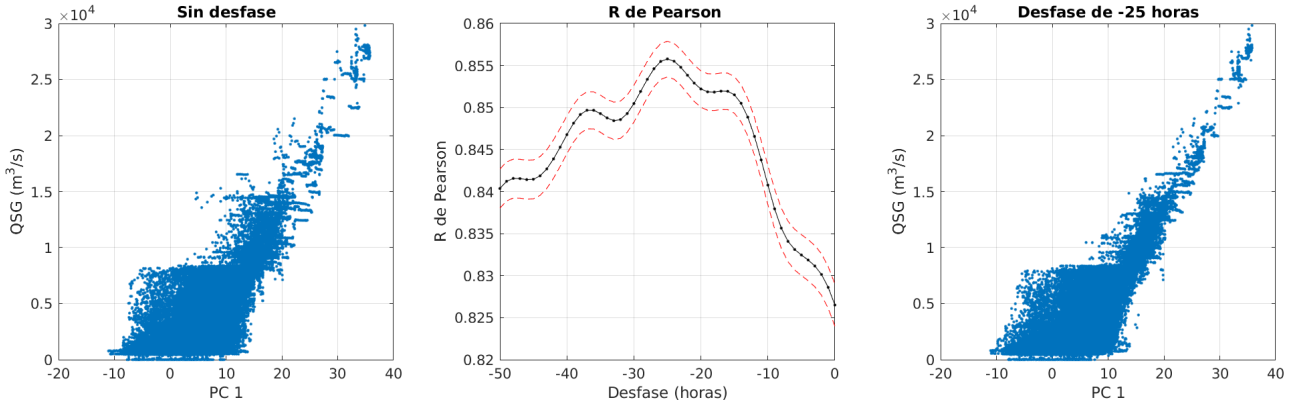


Figura 6.69: Correlación entre primera PC y caudal de Salto Grande (QSG). Izquierda: gráfico de dispersión entre señales sin desfase temporal. Centro: coeficiente de correlación de Pearson para distintos desfases entre las señales. Derecha: gráfico de dispersión entre señales para desfase que maximiza la correlación.

Comparando con la serie de nivel en Nueva Palmira, que se muestra en la figura 6.70, no es tan evidente la presencia de una fuerte correlación, ni siquiera en los momentos de caudales bajos. La observación anterior se verifica mediante la implementación de un gráfico de dispersión, que se muestra en la figura 6.71, y calculando el desfase temporal entre las series que maximiza su correlación, obteniendo un desfase de -34 horas con un R de Pearson de 0,482. En el gráfico de dispersión asociado a este desfase temporal, se puede apreciar que la nube de puntos presenta una cierta tendencia pero que tiene poca compacidad, lo cual se refleja en el valor de correlación relativamente bajo.

De este análisis se puede interpretar que el primer modo está influenciado principalmente por la señal de caudal erogado por Salto Grande, que presenta una alta correlación con la PC en cuestión, la cual a su vez explica el 97,5 % de la varianza del campo de velocidades en la zona analizada.

El segundo modo hallado explica el 1,3 % de la varianza del campo de velocidades en la zona de estudio. El campo vectorial asociado a la segunda EOF se presenta en la figura 6.72, en la que se puede observar que las zonas donde se tienen correlaciones por encima de 0,9 corresponden a patrones de recirculación que se dan en las bahías situadas inmediatamente al Este y Oeste de la ciudad de Fray Bentos en la margen uruguaya del río, así como en el límite Este de la bahía donde desemboca el río Gualeguaychú. Se observa que sobre la margen uruguaya, estos patrones de recirculación presentan sentido antihorario, mientras que sobre la margen argentina muestran sentido horario. Cabe observar que el primer modo presenta correlaciones bajas en estas mismas zonas. Se observa asimismo que el primer modo presenta valores un orden de magnitud por encima de los del segundo en el mapa de regresión (comparar figuras 6.67 y 6.72).

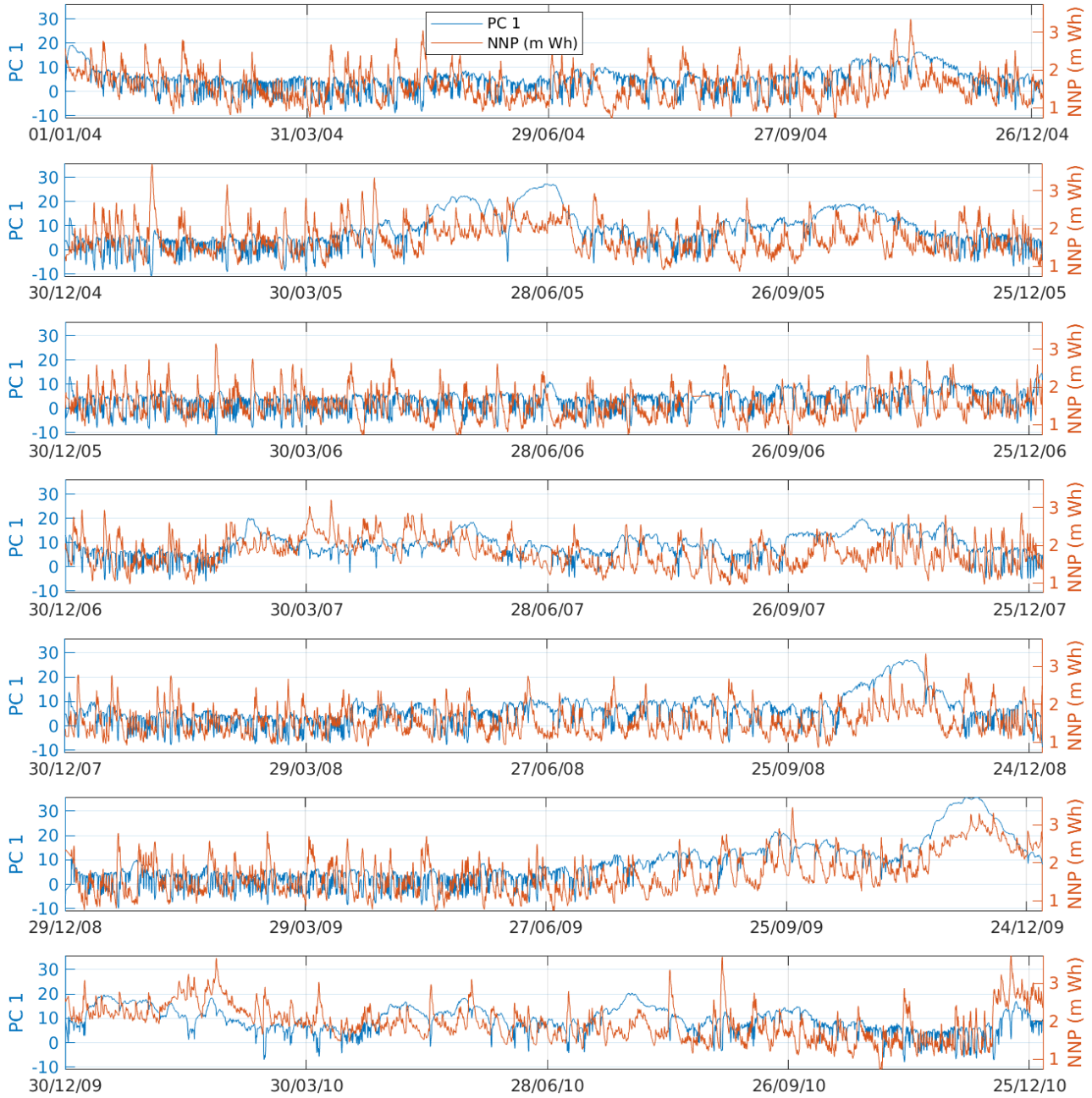


Figura 6.70: Series temporales de primera PC y nivel en Nueva Palmira (NNP), para comparación gráfica de las señales.

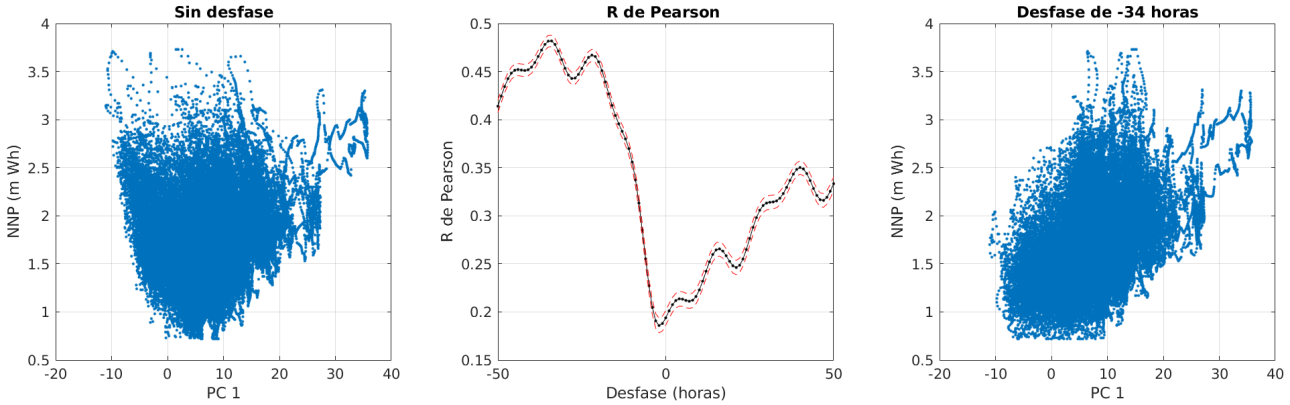


Figura 6.71: Correlación entre primera PC y nivel en Nueva Palmira (NNP). Izquierda: gráfico de dispersión entre señales sin desfase temporal. Centro: coeficiente de correlación de Pearson para distintos desfases entre las señales. Derecha: gráfico de dispersión entre señales para desfase que maximiza la correlación.

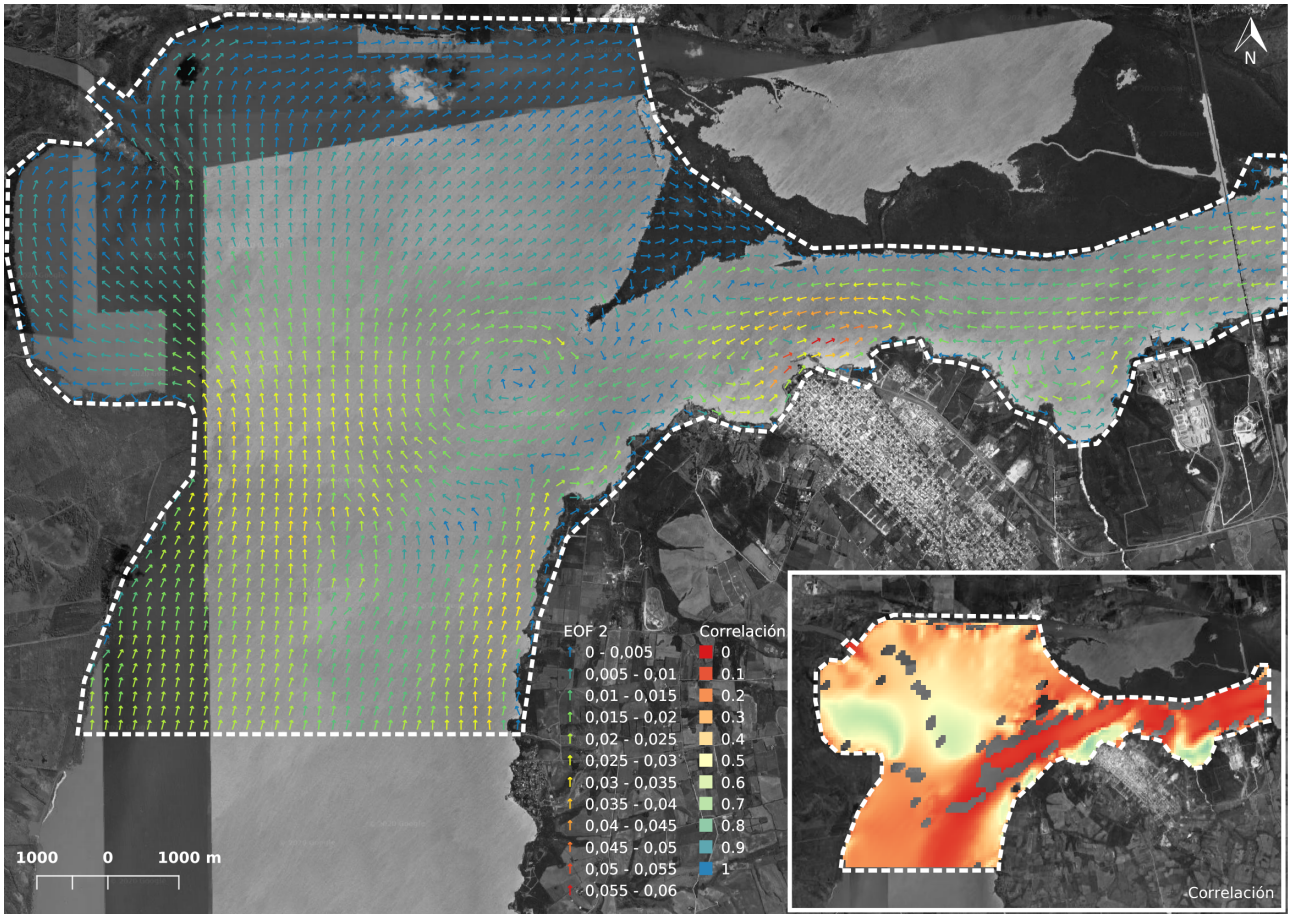


Figura 6.72: EOF asociada a la segunda PC, modo que explica el 1,3 % de la varianza del campo de velocidades en el área analizada. Abajo a la derecha: mapas de correlación de la segunda PC con los campos de velocidad U y V (estadísticamente significativa al 99 % de confianza).

Según se puede apreciar en la figura 6.73, la señal de la segunda PC tiene un comportamiento

similar a la de caudal únicamente en los períodos de caudal alto, mientras que el resto del tiempo presenta un comportamiento con intensidades de señal con valores incluso mayores a los de los momentos con caudal alto. El diagrama de dispersión presentado en la figura 6.74 muestra lo anterior de manera más objetiva, observando una mayor compacidad en la nube de puntos para valores de caudal superiores a 14.900 m^3/s aproximadamente, con un valor de R de Pearson máximo de 0,297 para un desfase temporal de -18 horas. Si se consideran únicamente los datos de caudal mayores a 14.900 m^3/s se obtiene un R de Pearson de 0,945 para un desfase temporal de -19 horas.

Combinando el hecho de que este segundo modo presenta correlaciones altas en las zonas con patrones de recirculación, donde el primer modo presenta correlaciones bajas entre su PC y las señales de velocidad así como valores bajos del módulo de su EOF (lo cual es esperable dada la ortogonalidad de los modos), y que la señal de la segunda PC muestra una alta correlación con la de caudales para valores superiores a los 14.900 m^3/s, se puede concluir que los patrones de recirculación que se observan se dan en momentos de caudal alto, lo cual se verifica observando la evolución temporal del campo de velocidades en la zona.

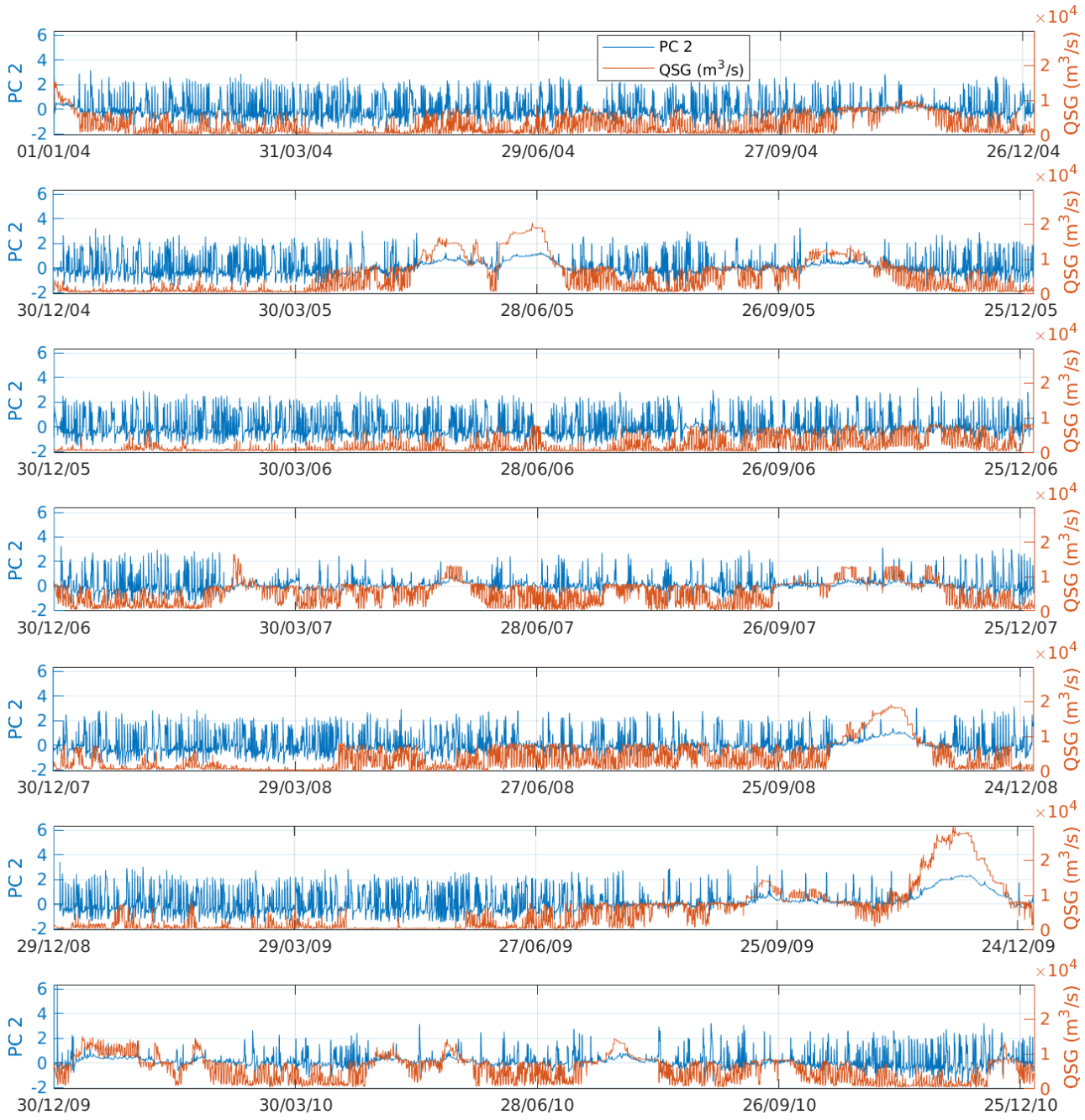


Figura 6.73: Series temporales de segunda PC y caudal de Salto Grande (QSG), para comparación gráfica de las señales.

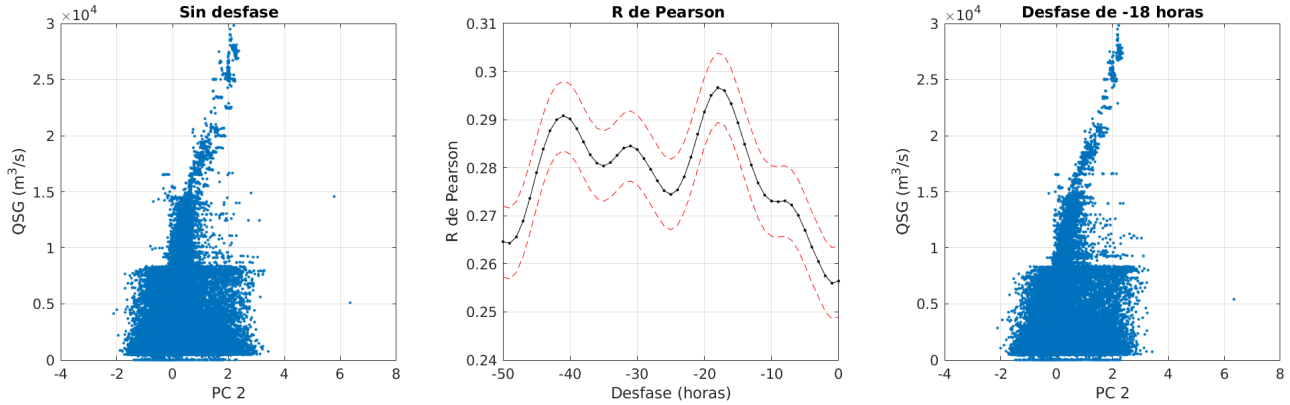


Figura 6.74: Correlación entre segunda PC y caudal de Salto Grande (QSG). Izquierda: gráfico de dispersión entre señales sin desfase temporal. Centro: coeficiente de correlación de Pearson para distintos desfases entre las señales. Derecha: gráfico de dispersión entre señales para desfase que maximiza la correlación.

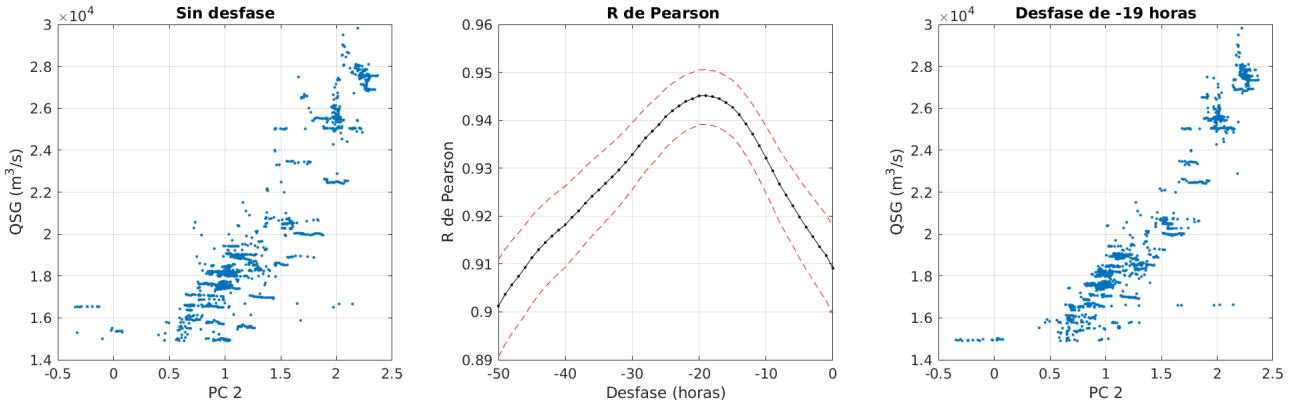


Figura 6.75: Correlación entre segunda PC y caudal de Salto Grande mayor a 14.900 m^3/s (QSG). Izquierda: gráfico de dispersión entre señales sin desfase temporal. Centro: coeficiente de correlación de Pearson para distintos desfases entre las señales. Derecha: gráfico de dispersión entre señales para desfase que maximiza la correlación.

Comparando ahora la señal de nivel en Nueva Palmira con la señal de la segunda PC, cuyos gráficos temporales se presentan en la figura 6.76, se observan algunas coincidencias entre los picos de las señales, lo cual finalmente no redunda en un valor alto de correlación, teniendo un máximo R de Pearson de 0,41 para un desfase temporal de 10 horas (el cual podría atribuirse a la correlación que existe entre las señales de caudal de Salto Grande y nivel de Nueva Palmira para valores altos de caudal, lo cual hace que tenga sentido el desfase temporal positivo). Por otro lado, si se analiza la correlación entre la señal de la segunda PC con la pendiente de la señal de niveles en Nueva Palmira (esto es, la tasa de cambio del nivel en el tiempo), se tiene que para un desfase de -4 horas se obtiene un R de Pearson de 0,779, como se puede ver en la figura 6.78. Este desfase de -4 horas es consistente con el tiempo de propagación de ondas de nivel desde Nueva Palmira hasta la zona en estudio, lo cual muestra que este modo se encuentra

influenciado por ese forzante.

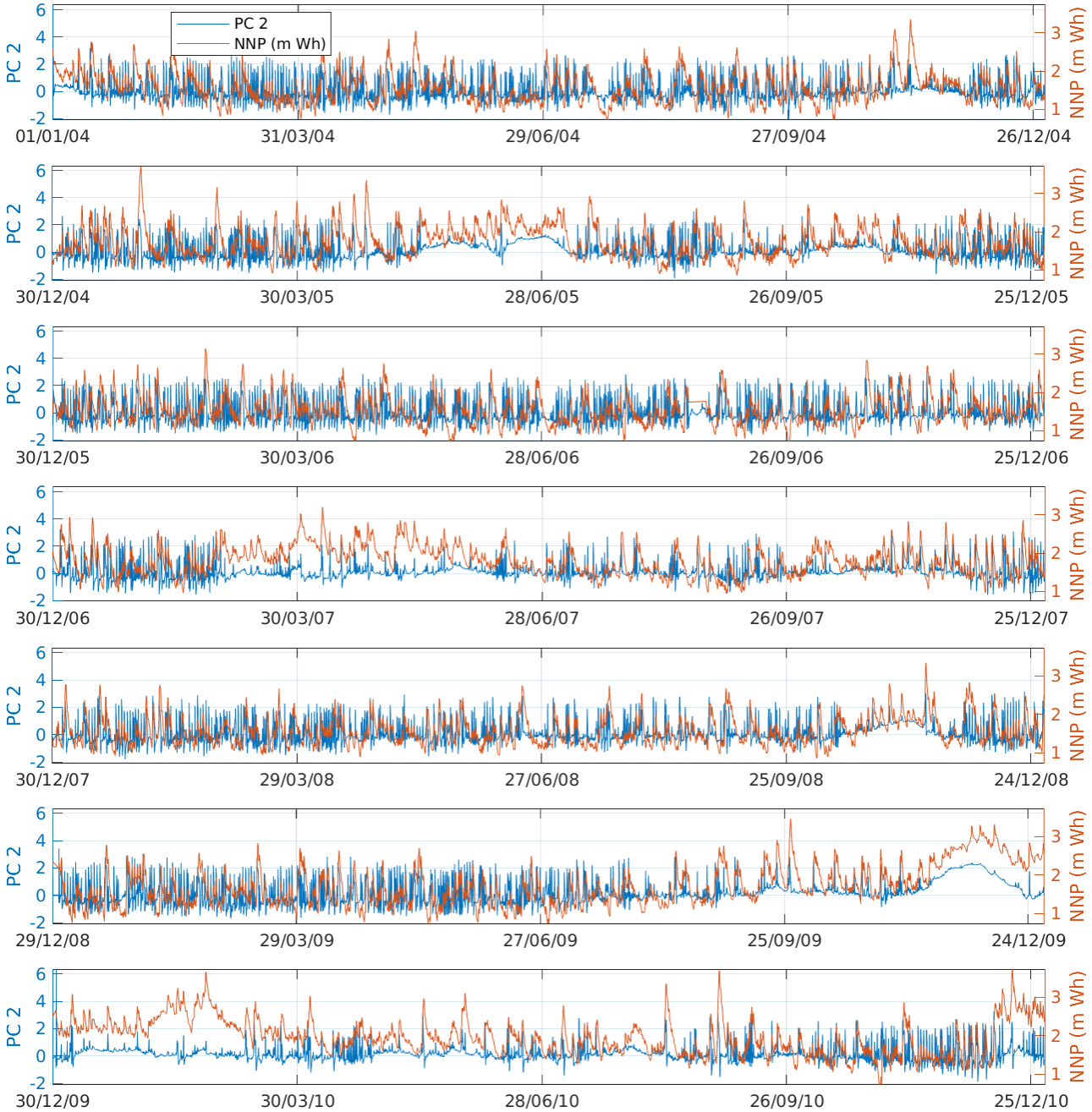


Figura 6.76: Series temporales de segunda PC y nivel en Nueva Palmira (NNP), para comparación gráfica de las señales.

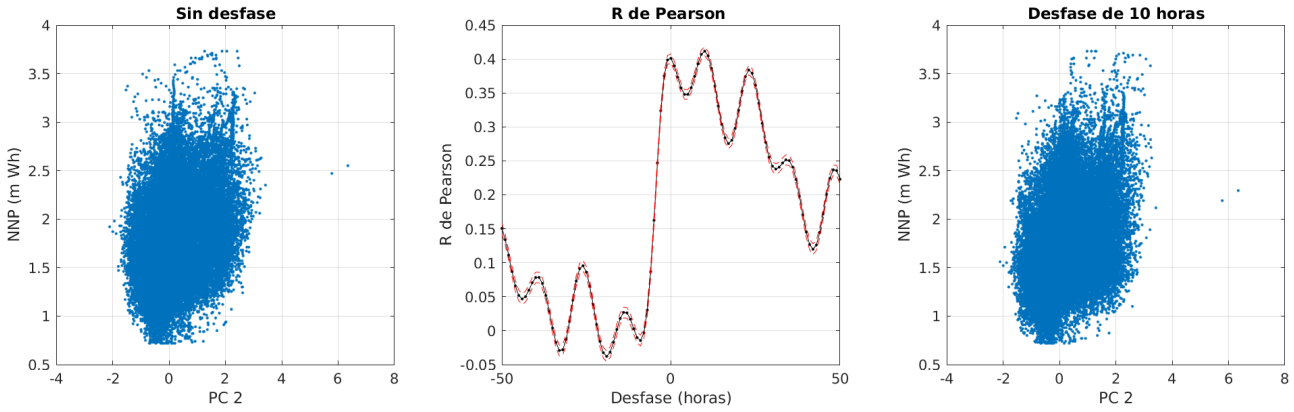


Figura 6.77: Correlación entre segunda PC y nivel en Nueva Palmira (NNP). Izquierda: gráfico de dispersión entre señales sin desfase temporal. Centro: coeficiente de correlación de Pearson para distintos desfases entre las señales. Derecha: gráfico de dispersión entre señales para desfase que maximiza la correlación.

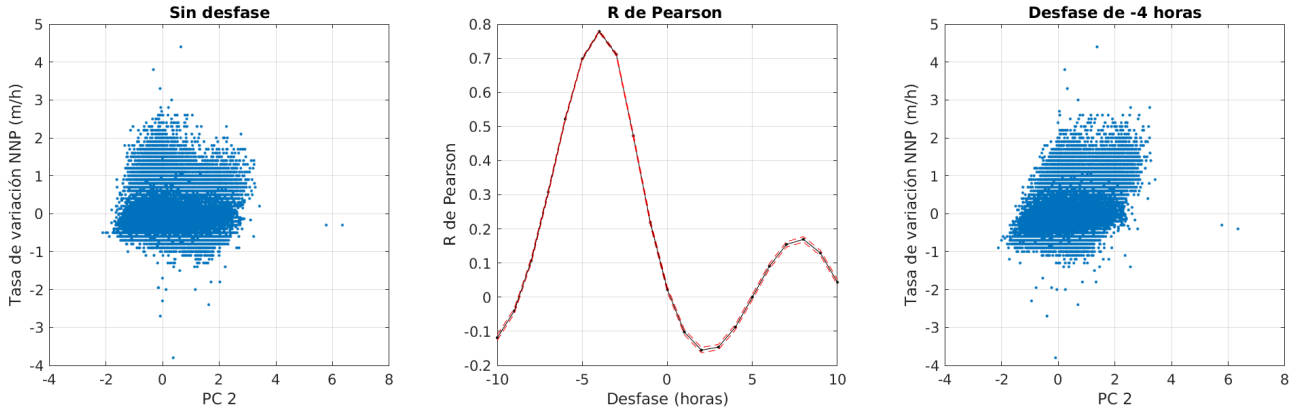


Figura 6.78: Correlación entre segunda PC y pendiente de nivel en Nueva Palmira (NNP). Izquierda: gráfico de dispersión entre señales sin desfase temporal. Centro: coeficiente de correlación de Pearson para distintos desfases entre las señales. Derecha: gráfico de dispersión entre señales para desfase que maximiza la correlación.

El tercer modo hallado, que explica el 0,4 % de la varianza, presenta valores de correlación bajos entre las componentes de la velocidad en la zona de estudio y la señal de PC correspondiente. Se entiende que el análisis de este modo no es demasiado interesante a los efectos de la identificación de patrones de flujo.

El cuarto modo identificado, que explica el 0,2 % de la varianza del campo de velocidades en la zona de estudio, presenta las mayores correlaciones entre su PC y las señales de las componentes del campo de velocidad en la zona de la desembocadura del río Gualeguaychú, según se puede apreciar en la figura 6.80, donde también se observa que en esa zona la EOF cuenta con los valores de módulo mayores, y que los vectores tienen sentido entrante al dominio desde la condición de contorno en caudales para el río Gualeguaychú.

Esto lleva a analizar la correlación entre la PC y la señal de caudal del Gualeguaychú, cuyos gráficos temporales se presentan en al figura 6.82, en la que se puede apreciar que presentan una fuerte semejanza, que se acentúa en los momentos de crecida del Gualeguaychú. Se obtiene un R de Pearson máximo de 0,57 sin desfase temporal, según se presenta en los gráficos de la figura 6.81. Se observa asimismo una mayor dispersión para caudales bajos y más compacidad en la nube de puntos para eventos de crecida.

De esto se puede concluir que la zona de influencia del caudal erogado por el río Gualeguaychú sobre los patrones de circulación está acotada a la zona inmediata alrededor de su desembocadura, y que a su vez explica valores relativamente bajos de la varianza del campo de velocidades en el área de estudio. Cabe observar que la forma en que está impuesta la condición de contorno en caudales del Gualeguaychú no permite que ocurran inversiones de flujo, por lo que el área de influencia de este puede estar siendo sobrestimada, principalmente en momentos de caudal bajo.

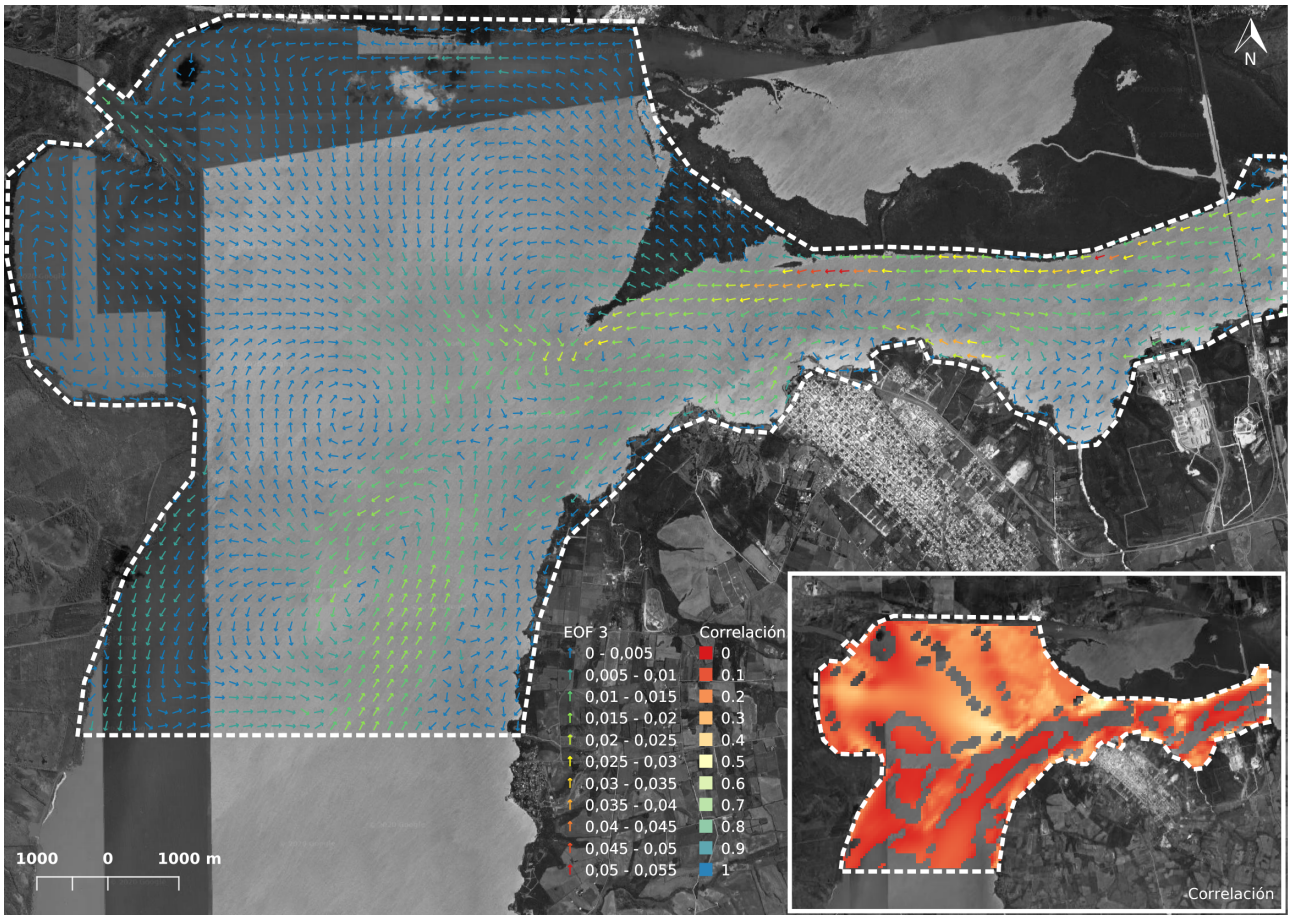


Figura 6.79: EOF asociada a la tercera PC, modo que explica el 0,4 % de la varianza del campo de velocidades en el área analizada. Abajo a la derecha: mapas de correlación de la tercer PC con los campos de velocidad U y V (estadísticamente significativa al 99 % de confianza).

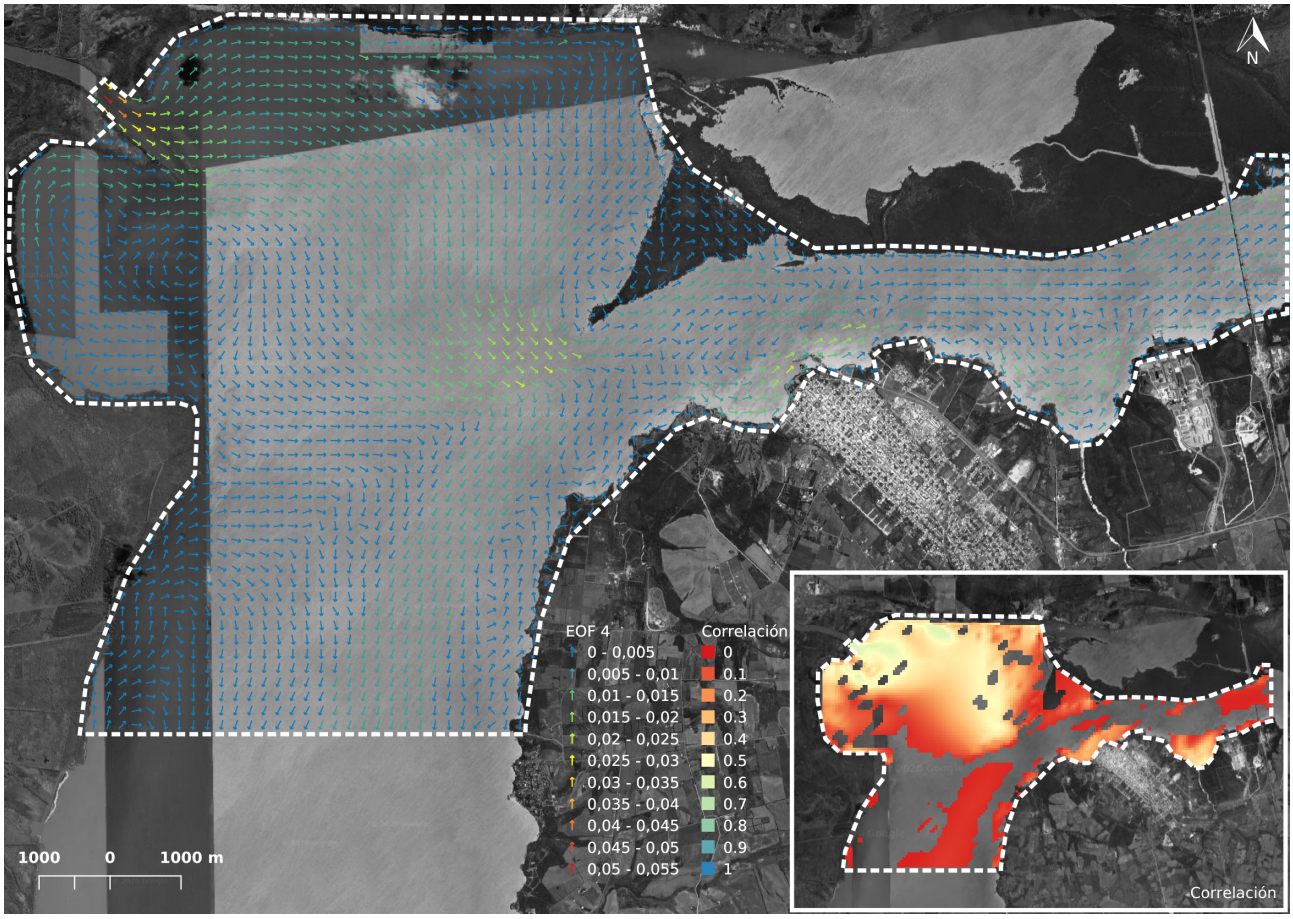


Figura 6.80: EOF asociada a la cuarta PC, modo que explica el 0,2 % de la varianza del campo de velocidades en el área analizada. Abajo a la derecha: mapas de correlación de la cuarta PC con los campos de velocidad U y V (estadísticamente significativa al 99 % de confianza).

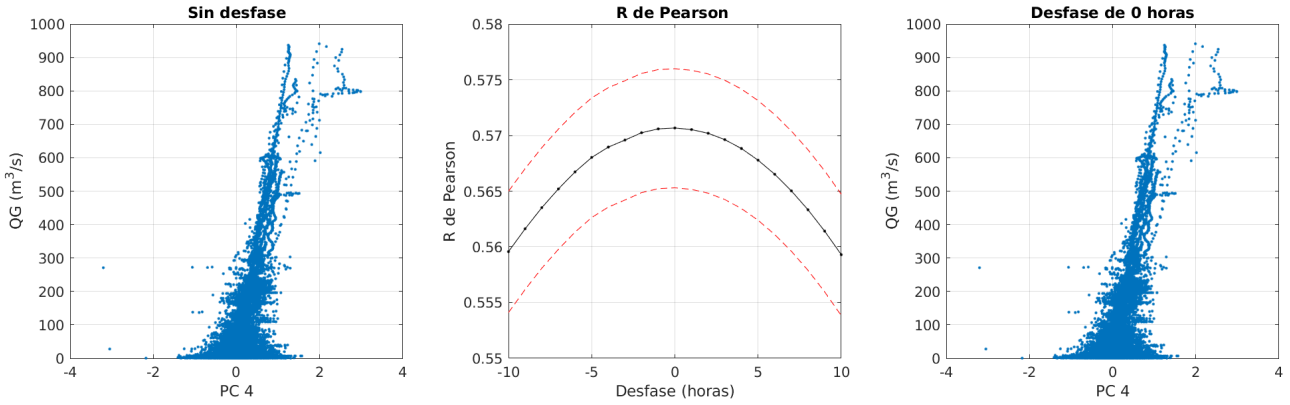


Figura 6.81: Correlación entre cuarta PC y caudal del río Gualeguaychú (QG). Izquierda: gráfico de dispersión entre señales sin desfase temporal. Centro: coeficiente de correlación de Pearson para distintos desfases entre las señales. Derecha: gráfico de dispersión entre señales para desfase que maximiza la correlación.

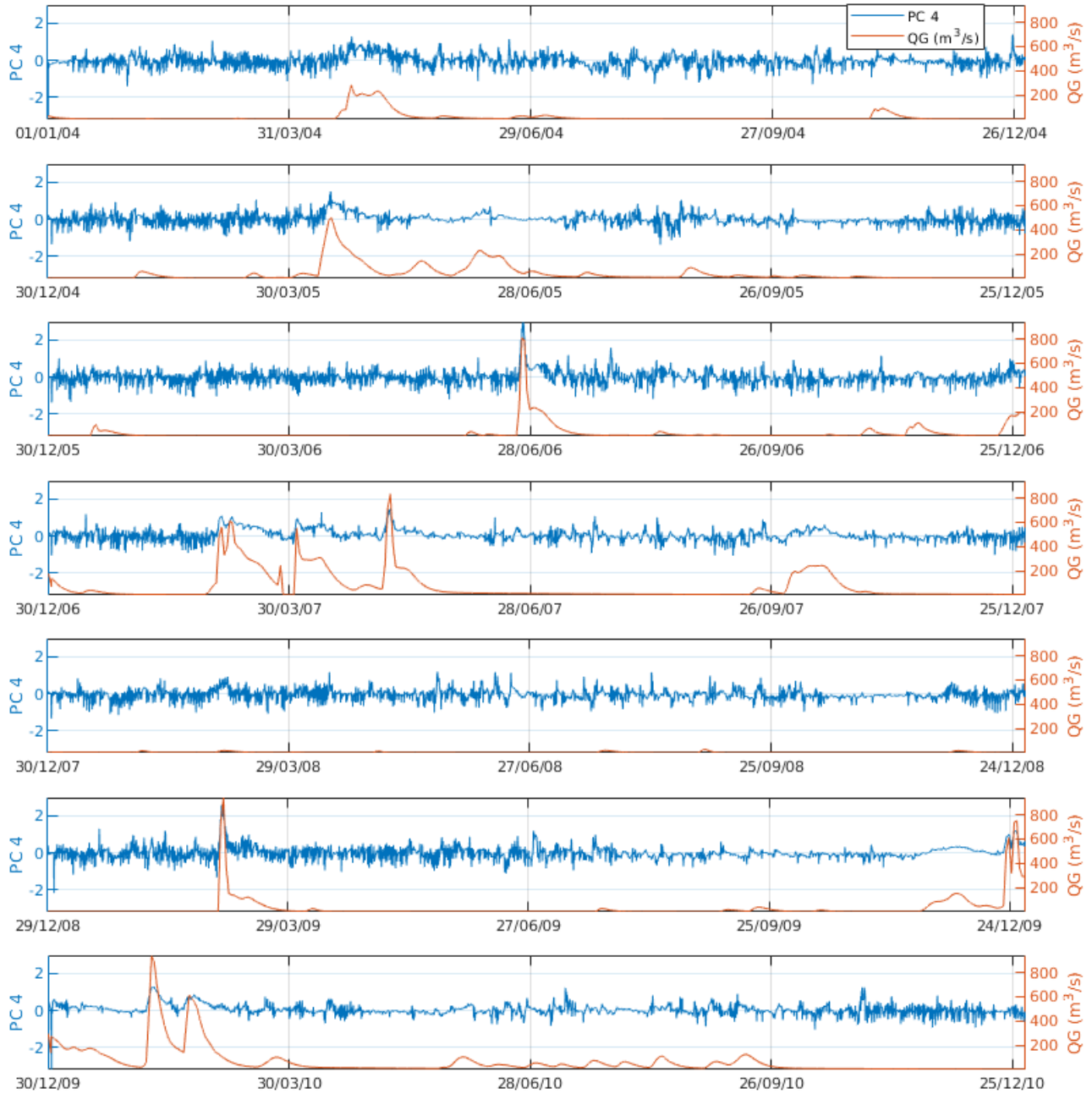


Figura 6.82: Series temporales de cuarta PC y caudal del río Gualeguaychú (QG), para comparación gráfica de las señales.

6.6. Síntesis

Como primer paso en la determinación de los patrones de flujo, se calcula el campo de velocidades promedio en el río. El análisis del mismo permite detectar la existencia de un tramo de 65 km entre Salto Grande y Paso Guaviyú (ubicado en la progresiva 285 km), donde se presentan las velocidades consistentemente más altas, con valores usualmente superiores a 1,0

m/s en el cauce, llegando hasta 1,5 y 2,0 m/s. Desde este punto hasta Concepción del Uruguay, en la progresiva 185 km, se observan velocidades promedio menores, del orden de 0,70 a 0,80 m/s, las que vuelven a aumentar en la zona del río con presencia más fuerte de islas, donde se observa que la mayoría del flujo discurre por el brazo Este, el cual presenta valores de velocidad media de entre 1,0 a 1,5 m/s inclusive. El brazo Oeste en este mismo tramo presenta valores de velocidad promedio mucho menores, del orden de los 0,50 m/s. A partir de la progresiva 140 km hasta la progresiva 90 km, aguas abajo de la ciudad de Fray Bentos, las velocidades se hacen más uniformes y toman valores del orden de 0,30 a 0,60 m/s. En el último tramo del río, entre la progresiva 90 km y el Río de la Plata, donde el cauce tiene un ancho superior al de los tramos anteriores, variando entre los 4 y los 10 km, las velocidades promedio toman valores máximos de hasta 0,40 m/s, estando los valores más usuales entre 0,10 y 0,20 m/s.

El campo de velocidades promedio permite definir, además del módulo medio de la velocidad, la dirección y sentido medios en cada punto de la grilla de cálculo. En base a estos últimos, se proyecta el vector velocidad en cada punto, y para cada paso de tiempo, obteniendo una serie temporal que indica el sentido de flujo, tomando valores positivos cuando la componente de la velocidad colineal con la dirección promedio tiene el mismo sentido que el campo promedio, y viceversa. Con este campo se analiza la fracción de tiempo de flujo aguas abajo ("FTaa") y aguas arriba ("FTAA") para cada punto de la grilla de cálculo. Para el Tramo 1 del río, se tiene que el cauce presenta una FTaa igual a 1, lo cual indica que no está afectado por inversiones de flujo. El Tramo 2 presenta una gradación del valor de FTaa, desde valores de 0,95 al Norte, llegando a 0,90 al Sur, alrededor de la progresiva 100 km, observándose que en el tramo de islas entre Concepción del Uruguay y Fray Bentos, el brazo Este del río presenta una FTaa mayor que la del Oeste, lo cual puede atribuirse a las mayores velocidades de circulación y mayor caudal que discurre por el primero. El Tramo 3 es el más afectado por inversiones de flujo, presentando una FTaa que varía entre 0,90 en la zona de Fray Bentos, hasta 0,75 inmediatamente aguas arriba de Nueva Palmira. Esto muestra que las inversiones de flujo son un patrón con una relevancia no despreciable en el comportamiento del río Uruguay, aumentando su preponderancia de Norte a Sur, como es de esperar, dado que son provocadas por la combinación de caudales bajos erogados por Salto Grande y picos de nivel en Nueva Palmira. En los tramos más afectados, este fenómeno puede estar presente entre un 10 y un 25 % del tiempo.

Dado el grado de influencia del fenómeno de inversión de flujo, se hace una caracterización estadísticas de la propagación de ondas aguas arriba, en términos de su velocidad y duración, relacionando estos parámetros con las series temporales de caudales erogados por Salto Grande y nivel de superficie libre en Nueva Palmira. La representación gráfica de estos eventos permite visualizar la variabilidad temporal de los mismos, teniendo que están asociados a picos de nivel en Nueva Palmira con una recurrencia en el orden de 1 evento cada 2 días (1.390 eventos identificados en 7 años), con duraciones entre 1 y 35 horas, pero que se ven fuertemente condicionados

por el caudal erogado por Salto Grande, dándose con mayor frecuencia en periodos de caudal bajo y medio, y llegando a ser totalmente aplacados en momentos con caudales superiores a los 10.000 m^3/s.

Se identifica un total de 1.390 eventos de inversión de flujo individuales dentro del período de 7 años simulado, los cuales presentan duraciones de entre 1 y 34 horas, con una primera moda en las 5 horas de duración y una segunda alrededor de las 17 horas. Se estima que los frentes de inversión de flujo se propagan a una velocidad de entre 15 a 20 km/h, con velocidades máximas de inversión de hasta 1,5 m/s a la altura de Nueva Palmira, del orden de 0,8 m/s hasta la progresiva 170 km, y que luego decrecen de forma prácticamente monótona hasta hacerse nulas en la progresiva 280 km. Por otro lado, las velocidades medias más usuales de estos eventos se encuentran por debajo de los 0,3 m/s. Los eventos que se dan en momentos de caudal alto rara vez se adentran más de 100 km río arriba, mientras que los asociados a caudales medios y bajos pueden llegar a adentrarse hasta 275 km, siempre y cuando tengan duraciones iniciales superiores a las 7 horas. Los eventos de mayor duración y que más se adentran en el río, los cuales presentan duraciones iniciales superiores a las 25 horas, están asociados a picos de nivel en Nueva Palmira superiores a los 2,5 m Wh que se dan en momentos de caudales inferiores a los 1.000 m^3/s.

Aplicando análisis de componentes principales para el campo de velocidades en la zona del río entre las progresivas 106 y 90 km, se halla un primer modo con una EOF muy similar al campo de velocidades promedio, y una PC con una señal muy similar a la de caudales erogados por Salto Grande, pero que cuenta además con valores negativos que contemplan las inversiones de flujo. Este primer modo explica el 97,5 % de la varianza del campo de velocidades, presentando los mayores valores de correlación sobre el cauce del río. Esto muestra el grado de influencia de la señal de caudal de Salto Grande sobre el comportamiento del campo de velocidades en la zona. El segundo modo explica el 1,3 % de la varianza, presentando zonas de recirculación en las bahías ubicadas al Este y Oeste de la ciudad de Fray Bentos, así como en la zona Este de la bahía del Ñandubaysal. La PC de este modo tiene una alta correlación con los valores altos de caudal, así como con la tasa de cambio de niveles en Nueva Palmira. Estos primeros dos modos permiten determinar la existencia de celdas de recirculación en las zona mencionadas, las cuales se asocian a caudales altos. El tercer modo presenta bajas correlaciones con el campo de velocidad, no siendo de mayor interés para la determinación de patrones de flujo. El cuarto modo hallado, que explica el 0,2 % de la varianza, presenta una alta correlación con el campo de velocidades en la desembocadura del Gualeguaychú, con una PC que tiene también una alta correlación con la señal de caudal del río Gualeguaychú, especialmente en momentos de crecidas de este. Este último modo muestra la influencia extremadamente localizada del río Gualeguaychú sobre los patrones de flujo del río Uruguay en la zona, incluso en la zona interior de la bahía del Ñandubaysal.

El análisis de los patrones de flujo realizado para el tramo en estudio muestra que los eventos de inversión, los cuales son un fenómeno conocido en el río Uruguay pero escasamente estudiado hasta el momento, tienen una relevancia no menor en el comportamiento del río, pudiendo estar presentes entre un 10 y un 25 % del tiempo con duraciones de hasta 35 horas e intensidades comparables a las velocidades usuales de circulación aguas abajo, adentrándose hasta 280 km río arriba.

Capítulo 7

Conclusiones

El estudio de antecedentes particulares en modelación hidrodinámica del río Uruguay, así como de casos de estudio de cursos de agua de similares características, permite establecer que el enfoque metodológico empleado en el desarrollo de esta tesis ha alcanzado el estado del arte en la materia. El modelo implementado es el primero en incorporar los caudales de aporte de varias cuencas aguas abajo de Salto Grande considerando su variación temporal, así como la influencia del viento con su variación en tiempo y espacio, y en ser validado con datos de medición de velocidad mediante ADCP. Asimismo, es el primer modelo utilizado para simular un período de tiempo extendido, de 7 años consecutivos.

El tramo del río Uruguay entre Salto Grande y el Río de la Plata presenta un buen grado de instrumentación, contando con 13 estaciones limnimétricas, así como con mediciones de caudal en las represas de Salto Grande y Palmar, que son los principales aportes, con una calidad de datos aceptable. El solapamiento temporal de estos datos permite simular un período de 7 años entre 2004 y 2010 inclusive, que es el analizado en la presente tesis. Las limitantes más restrictivas para el período de tiempo simulado son el registro de niveles en Nueva Palmira, para el cual al momento de la implementación del modelo se contó con datos hasta el año 2010 inclusive, y el registro de caudales erogados por la represa Palmar, con datos desde el 2004 hasta el 2016. En los últimos dos años ha incrementado la accesibilidad por parte del público general a datos de estaciones limnimétricas y de precipitaciones, pero no así a los datos de series temporales históricas de los caudales erogados por las represas de Salto Grande o Palmar, cuyas series históricas completas no se encuentran disponibles públicamente.

La implementación del modelo se basa en relevamientos batimétricos de distintas fuentes, pero principalmente provenientes de una forma u otra del SOHMA, los cuales presentan una fuerte heterogeneidad en términos de densidad y cobertura de las distintas zonas del tramo en estudio, e incluso carencias de información. La información disponible públicamente corresponde al Atlas Cartográfico del Río Uruguay, el cual tiene como objetivo ser de utilidad para la navegación, por lo cual no presenta una densidad de información suficiente para una cabal

representación de la geometría del río, contando además con vacíos de información en zonas en las que no esté prevista la navegación. Los vacíos de información se encuentran específicamente en las zonas fuera del canal de navegación del tramo entre Fray Bentos y Nueva Palmira, donde el río incrementa su ancho hasta valores de 10 km, la totalidad del brazo Oeste del río entre las ciudades de Concepción del Uruguay y San Javier, siendo estos dos los vacíos de información batimétrica más notorios y relevantes. Otros vacíos de menor relevancia corresponden a la zona ubicada entre la costa uruguaya y las islas Santa María Grande, Santa María Chica y Naranjito, el canal de San Lorenzo ubicado entre la isla homónima y la costa argentina, los canales secundarios entre las islas Román Grande, Román Chica, Pingüino, Chala, Redonda y Navarro, los canales alrededor de la isla Volantín, y la desembocadura del río Queguay Grande. Además, esta fuente de información batimétrica no cuenta con suficiente densidad de datos para la adecuada representación de zonas de concentración de flujo, específicamente entre las progresivas 170 a 175 km, donde las altas velocidades en eventos de crecida pueden llevar a la aparición de una pérdida de carga alta, elevando artificialmente los niveles aguas arriba de este punto al simular esas situaciones en el modelo. Esto lleva a que durante el proceso de calibración se asignen valores de coeficiente de fricción de fondo en el Tramo 2 (entre la progresiva 254 km y la ciudad de Fray Bentos) que son hasta un 50 % inferiores a los usualmente recomendados en la bibliografía para cursos de agua de estas características, pero que son necesarios para que el modelo represente adecuadamente las variables de interés del sistema. El resto de la información batimétrica utilizada para la implementación del modelo no se encuentra disponible públicamente, y en este trabajo se pudo acceder a la misma dado que parte de esta tesis se desarrolló en el marco de una beca de la CARU.

Un mayor acceso a la información tanto batimétrica como de series temporales de caudales y niveles, fundamental no solo para la adecuada implementación de modelos hidrodinámicos, sino también para una gran variedad de otras aplicaciones tanto de investigación académica como de gestión y consultoría, colaboraría en incrementar el conocimiento del río Uruguay, aportando mayor cantidad y calidad de información para la toma de decisiones en lo concerniente al uso y gestión de este curso de agua. Se espera que los resultados obtenidos en esta tesis puedan contribuir a avanzar en este sentido.

De la etapa de calibración del modelo se tiene que la configuración que mejor se acerca a la representación de las series de datos de nivel consideradas, corresponde a un coeficiente de fricción de Manning en el cauce de 0,022 para el Tramo 1 (entre la represa de Salto Grande y la progresiva 254 km), 0,010 para el Tramo 2 (entre el final del Tramo 1 y la ciudad de Fray Bentos), 0,025 para el Tramo 3 (entre la ciudad de Fray Bentos y el Río de la Plata), 0,25 en planicie de inundación e islas y un coeficiente de influencia del viento de 1,46E-6. De la validación se desprende que el modelo hidrodinámico implementado logra un ajuste muy satisfactorio de los niveles medidos, presentando valores de correlación del orden de 0,98, con un ERMS medio

de 0,33 m, el cual decrece de Norte a Sur, a la par del rango de variabilidad de los niveles. Este comportamiento del ERMS puede estar asociado, además de a la variación del rango de niveles, a las velocidades características de cada tramo, esto es: el Tramo 1, que presenta las mayores velocidades, tiene asimismo una mayor sensibilidad al coeficiente de fricción, el cual a su vez puede variar en el tiempo dentro del cauce en respuesta a eventos de crecida o caudales con valor suficiente como para dar lugar a la aparición formas de fondo; el Tramo 2, que presenta velocidades menores, pero varias zonas de concentración de flujo donde se generan pérdidas de carga importantes, podría encontrarse en una situación similar. Lo anterior, que implica que el coeficiente de fricción podría ser mayor en eventos de crecida, explicaría por qué el modelo subestima los valores de nivel altos para las estaciones ubicadas en estos tramos. Por otro lado, la sobrestimación de los valores de nivel bajos podría deberse a la necesidad de una mejor representación de la batimetría, dado que la densidad de datos de la información utilizada en la implementación del modelo suele llevar a subestimar el área de la sección transversal del río, lo cual puede traer como consecuencia un aumento de los niveles simulados en momentos de caudales bajos.

La comparación de los resultados del campo de velocidades con valores medidos con ADCP en distintos puntos del río, permite por un lado evidenciar algunas carencias en los datos de la batimetría, como fuera mencionado anteriormente, pero asimismo muestra que el campo simulado presenta valores sumamente cercanos a los medidos, con resultados especialmente satisfactorios en la zona de Fray Bentos. Para implementar una validación cuantitativa de los perfiles de velocidad simulados, sería necesario contar con información completa de condiciones de contorno que permitan simular los momentos exactos en los que se realizaron las mediciones con ADCP, de modo de poder comparar directamente perfiles medidos contra simulados.

La metodología implementada para la determinación de los principales patrones de flujo arroja luz sobre un fenómeno conocido pero poco estudiado en el río Uruguay, como son las inversiones de flujo. Más allá de que el sentido del campo de velocidad promedio vaya de aguas arriba hacia aguas abajo, como es esperable, se tiene que gran parte del río está afectado por el fenómeno de inversión, el cual puede estar presente por encima del 20 % del tiempo en las zonas más afectadas en el Tramo 3, llegando a adentrarse hasta 280 de los 350 km entre el Río de la Plata y Salto Grande. Se observa además que las zonas que presentan mayores velocidades promedio, en general se ven menos afectadas por eventos de inversión, en comparación con zonas cercanas que presentan velocidades promedio menores.

El estudio de las inversiones de flujo tanto en términos globales como de caracterización de eventos individuales, permite determinar que estos se dan en momentos de caudales bajos a medios, con el ingreso de picos de nivel por Nueva Palmira, asociados a eventos de marea meteorológica del Río de la Plata, teniendo velocidades de propagación de entre 15 a 20 m/s, con velocidades de inversión extremas de hasta 1,5 m/s, siendo lo más usual que estén en

el orden de los 0,2 m/s, disminuyendo de Sur a Norte. La duración más frecuente de estos eventos es de 5 horas, presentando otra moda en 17 horas, con duraciones máximas de hasta 34 horas. Los eventos que más se adentran en el río están asociados a caudales bajos, y los de mayor duración a su vez corresponden a la ocurrencia conjunta de estos caudales con picos de nivel altos en Nueva Palmira. En cambio, picos de nivel altos combinados con caudales medios a altos (por encima de los 5.000 m^3/s) no generan inversiones de flujo de gran magnitud ni extensión. Este fenómeno, que rara vez se asocia al comportamiento de un río, es de relevancia al momento de estudiar la dispersión de contaminantes o sustancias, o de planificar o diseñar tomas de agua y emisarios de efluentes, por lo que se espera que los resultados presentados en esta tesis ayuden a visibilizar la magnitud y características de las inversiones de flujo en el río Uruguay, contribuyendo a un mejor uso y gestión del mismo en este sentido.

El estudio de los patrones de flujo en la zona de Fray Bentos aplicando análisis de componentes principales permite determinar la existencia de un primer modo que explica el 97,5 % de la varianza, con una EOF muy similar al campo medio de velocidades y una PC fuertemente correlacionada con la señal de caudal de Salto Grande, mostrando que este es de los forzantes con mayor preponderancia en la hidrodinámica del sistema. Esta primera PC presenta asimismo valores negativos en los momentos de caudales bajos, los cuales contemplan los eventos de inversión de flujo. Se halla un segundo modo, que explica el 1,3 % de la varianza, asociado a zonas de recirculación en bahías, que se correlaciona fuertemente con caudales altos, lo cual indica que estas celdas de recirculación están presentes en momentos de crecida. Este modo también se correlaciona con la tasa de variación temporal del nivel de superficie libre en Nueva Palmira, con un desfase temporal de -4 horas, lo cual indica que también está influenciado por la propagación de ondas de nivel desde el Río de la Plata. El tercer modo hallado no reporta mayor interés para el análisis de los patrones de flujo en la zona. El cuarto modo, que explica el 0,2 % de la varianza, se correlaciona con el caudal entrante desde el río Gualeguaychú, con una zona de influencia que se extiende únicamente a las cercanías de la desembocadura del mismo, mostrando la poca influencia de este en los patrones de circulación de la zona.

Como oportunidad de mejora, se identifica la necesidad de contar con información batimétrica de mayor nivel de detalle, que no solamente cubra las áreas que son de interés para la navegación, sino además brazos secundarios que tienen influencia sobre el comportamiento hidrodinámico del río. Según fuera indicado anteriormente, las áreas de mayor relevancia corresponden a las zonas fuera del canal de navegación del tramo entre Fray Bentos y Nueva Palmira, donde el río incrementa su ancho hasta valores de 10 km, y la totalidad del brazo Oeste del río entre las ciudades de Concepción del Uruguay y San Javier. También son de importancia los puntos de concentración de flujo en el Tramo 2, específicamente entre las progresivas 170 a 175 km. Una batimetría adecuada, con mayor densidad y mejor calidad de datos que la disponible actualmente, es la base para una buena calibración del modelo, con parámetros que se encuen-

tren dentro de valores físicamente razonables, y una mayor aproximación en la representación de los niveles de superficie libre y velocidades en los distintos tramos del río. Asimismo, es necesario un mayor nivel de acceso a la información de base en términos de series temporales históricas de caudales erogados por las represas de Palmar y Salto Grande, los cuales no están disponibles en bases de datos de acceso libre por parte del público general. El acceso a estos datos permitiría mejorar la herramienta implementada, abriendo la posibilidad de simular períodos de tiempo aún más prolongados que los ya abarcados en esta tesis, lo cual a su vez incrementaría la cantidad de información para una mejor caracterización de los patrones de flujo del río, así como el estudio de fenómenos asociados a escalas temporales mayores, facilitando además el desarrollo de futuras líneas de investigación y nuevas herramientas de gestión del curso de agua.

A pesar de las oportunidades de mejora desarrolladas anteriormente, el modelo implementado permite una comprensión en mayor nivel de detalle de la hidrodinámica del río Uruguay entre Salto Grande y el Río de la Plata, conformando una base para futuras líneas de investigación así como herramientas de evaluación y gestión. Contar con un modelo global del río abre la posibilidad de hacer foco en zonas de interés para una modelación más detallada, utilizando los datos generados en este como condiciones de contorno, permitiendo estudiar fenómenos localizados, como transporte de sedimentos, oleaje por viento local, erosión o dispersión de contaminantes, teniendo en cuenta la variabilidad de la dinámica global del sistema. Permite asimismo la realización de experimentos numéricos modificando condiciones de contorno asociadas a los forzantes, rozamiento o batimetría del modelo, para estudiar el comportamiento del sistema frente a distintas situaciones de interés, por ejemplo, caracterizar la propagación de ondas de inversión de flujo asociadas a picos de marea meteorológica para distintos valores de caudal circulante por el río. La interacción entre el modelo implementado en el marco de esta tesis, con los modelos hidrodinámicos del Río de la Plata desarrollados por el IMFIA, permitiría en primer lugar una mejor representación de la condición de contorno de caudal del río Uruguay en el Río de la Plata interior, potencialmente incrementando la validez de los patrones de circulación simulados para esa zona, en el marco de modelos de "hindcast". En segundo lugar, en base a las predicciones de caudal erogado por Salto Grande, se puede generar una sinergia entre un modelo operacional del Río de la Plata y uno del río Uruguay, donde el primero genere la condición de contorno en nivel en Nueva Palmira para el segundo, y este genere la condición de contorno en caudal para el primero, permitiendo contar con un modelo predictivo de los niveles y campos de velocidad del río Uruguay, y además mejorar la predicción en el Río de la Plata interior. Se podría pensar en líneas similares incorporando la hidrodinámica del río Paraná. Por otra parte, el modelo del río Uruguay permite estudiar el impacto del cambio climático sobre la dinámica de este cuerpo de agua, tanto en términos del incremento del nivel medio del mar, que repercute directamente en la condición de contorno en niveles en Nueva Palmira, como de

la variabilidad de los eventos de precipitación que generan los caudales que ingresan al tramo del río.

Más allá del interés académico, este trabajo abre las puertas a la implementación de herramientas de evaluación y gestión, por ejemplo asociadas al vertido de aguas residuales, teniendo en cuenta la dinámica del sistema y la existencia de eventos de inversión de flujo, permitiendo evitar o contabilizar el riesgo de ocurrencia de cortocircuitos entre el vertido de efluentes y las tomas de agua para potabilización, o la potencial interferencia con otros usos del agua, o también, en base a un modelo operacional, realizar una predicción de profundidades y velocidades como ayuda a la navegación. Para realmente abrir la posibilidad al desarrollo de este tipo de herramientas, no basta sólo con los aportes realizados por esta tesis en términos de la implementación de un modelo hidrodinámico y el estudio de los patrones de flujo del río, sino que es necesario dar continuidad a su desarrollo en un marco institucional, pudiendo ser adoptado y extendido a otras aplicaciones por parte de instituciones con competencias e intereses sobre el río Uruguay, como la CARU, la DINAMA, la DNH, la ANP, el SINAE, y otras.

Referencias bibliográficas

Abbott, M. (1979). *Computational Hydraulics: Elemenst of the Theory of Free Surface Flows*. Pitman Publishing Limited, International Institute for Hydraulic and Environmental Engineering, Delft.

ANP (2020). Web Institucional de la Administración Nacional de Puertos. http://www.anp.com.uy/inicio/inicio.

Barton, A. J. (2019). Blue Kenue enhancements from 2014 to 2019. In *Telemac User Club*.

Bombardelli, F. A., Menéndez, A. N., Brea, J. D., Lapetina, M. R., and Uriburu Quirno, M. (1995). Estudio hidrodinámico del Delta del río Paraná mediante modelación matemática. Technical report.

Capote, J. (2008). Influencia del modelo de turbulencia y del refinamiento de la discretización espacial en la exactitud de las simulaciones computacionales de incendios. *Revista Internacional de Métodos Numéricos para Cálculo y Diseño en Ingeniería*, 24(3):227–245.

Cardini, J., Zabalett, A., Oliver, N., and Mársico, D. (2004). Efecto de los coeficientes de dispersión sobre la modelación bidimensional del transporte de contaminantes. Caso de estudio. *Mecánica Computacional*, XXIII:1201–1214.

CARU (2020). Dragado y balizamiento del río Uruguay catalogado como un hecho histórico. https://www.caru.org.uy/web/2019/02/dragado-y-balizamiento-del-rio-uruguay-catalogado-como-un-hecho-historico/.

Casterá, M. (2015). Modelación Numérica del Transporte de Efluentes en un Curso Fluvial: Caso Río Uruguay. M.Sc. dissertation, Facultad de Ingeniería, Universidad de la República, Montevideo, Uruguay.

Chen, Y.-S. (1987). Computation of turbulent flow using an extended turbulence closure model. Contractor Report CR-179204, NASA, Marshall Space Flight Center, Alabama, 35812.

Chow, W. (2005). Numerical simulations on thermal plumes with k-epsilon types of turbulence models. *Building and Environment*, (42):2819–2828.

DINAMA (2020). Sistema de Información Ambiental del MVOTMA. https://www.dinama.gub.uy/visualizador/index.php?vis=sig.

Dirección de Geodesia (2016). Modelo Digital de Elevaciones de la República Argentina. Technical report, Instituto Geográfico Nacional, Avda.Cabildo 381 C1426 - AAD C.A.B.A.

Dirección General de Recursos Naturales (2016). Modelo digital de terreno. http://www.mgap.gub.uy/unidad-organizativa/direccion-general-de-recursos-naturales/tramites-y-servicios/biblioteca-digital/modelo-digital-del-terreno.

Erasun, V. (2018). Estudio de factibilidad de modelación hidrológica en subcuencas del río Uruguay para la gestión del riesgo de inundaciones aguas abajo de la represa Salto Grande.

Flather, R. A. (1976). Results from surge prediction model of the North-West European continental shelf for April, November and December 1973. Technical Report 24, Institute of Oceanography, UK.

Fossati, M., Cayocca, F., and Piedra-Cueva, I. (2014a). Fine sediment dynamics in the Río de la Plata. *Advances in Geosciences*, 39:75–80.

Fossati, M. and Piedra-cueva, I. (2008). Numerical modelling of residual flow and salinity in the Río de la Plata. *Applied Mathematical Modelling*, 32:1066–1086.

Fossati, M. and Piedra-Cueva, I. (2013). A 3D hydrodynamic numerical model of the Río de la Plata and Montevideo's coastal zone. *Applied Mathematical Modelling*, 37(3):1310–1332.

Fossati, M., Santoro, P., Mosquera, R., Martínez, C., Ghiardo, F., Ezzatti, P., and Pedocchi, F. (2014b). Dinámica de flujo del campo salino y de los sedimentos finos en el Río de la Plata. *Revista Iberoamericana del Agua*, (May):48–63.

Hervouet, J.-M. (2007). *Hydrodynamics of free surface flows*. John Wiley and Sons, Ltd, Electricité de France (EDF), France.

Iriondo, M. and Kröhling, D. (2008). *Cambios ambientales en la cuenca del Uruguay-desde 2 millones de años hasta el Presente*.

Jaime, P. and Menéndez, Á. (1997). Modelo Hidrodinámico del río Paraná desde Yacyreta hasta la ciudad de Paraná. Technical report, Instituto Nacional del Agua, Ezeiza, Argentina.

Jaime, P. and Menéndez, Á. (1999). Modelo Hidrodinámico Río de la Plata 2000. Technical report, Instituto Nacional del Agua, Ezeiza, Argentina.

Julien, P. Y. (2018). *River Mechanics*. Cambridge University Press, Cambridge.

Larenze, G., Loschacoff, C. S., Brea, J. D., Arcelus, A., and Lorenzo, E. (1998). Modelación matemática del río Uruguay. In *XVII Congreso Nacional del Agua*, Santa Fé, Argentina.

Launder, B. (1974). The Numerical Computation of Turbulent Flows. *Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering*, 3:269–289.

Lomax, H. (2001). *Fundamentals of Computational Fluid Dynamics*. Springer-Verlag, Berlin.

Lorenzo, E., Teixeira, L., and Mena, M. (1998). Modelación hidrosedimentológica del río Uruguay. In *XVII Congreso Nacional del Agua*, Santa Fé, Argentina.

Matteucci, S. (2012). *Ecorregión Delta e Islas de los Río Paraná y Uruguay*, pages 447–488.

Mechoso, C. (1975). Un modelo matemático del río Uruguay. *Revista de Ingeniería*, (16).

Nakamura, S. (1991). *Applied Numerical Methods with Software*. Pearson Professional Education, New Jersey, United States.

Paoli, C. and Schreider, M. (2000). *El río Paraná en su tramo medio. Constribución al conocimiento y prácticas ingenieriles en un gran río de llanura*. Centro de Publicaciones, Secretaría de Extensión, Universi Nacional del Litoral, 9 de Julio 3563-3000, Santa Fé, Argentina.

Parsons, D., Jackson, P., Czuba, J., Engel, F., Rhoads, B., Oberg, K., Best, J., Mueller, D., Johnson, K., and Riley, J. (2013). Velocity mapping toolbox (vmt): A processing and visualization suite for moving-vessel adcp measurements. *Earth Surface Processes and Landforms*, 38:1244–1260.

Peruzzo, F., Riccardi, G., and Basile, P. A. (2018). Implementación del modelo matemático Telemac-2D para el análisis de la evolución de la hidrodinámica en un tramo del río Paraná inferior. In *4to Encuentro de Investigadores en Formación en Recursos Hídricos – IFRH 2018*, Ezeiza, Argentina.

Piedra-cueva, I. and Fossati, M. (2007). Residual currents and corridor of flow in the Rio de la Plata. *Applied Mathematical Modelling*, 31:564–577.

Piedra-Cueva, I., Terra, R., Cazes, G., Fossati, M., Ferández, M., and Santoro, P. (2008). Modelo Pre-Operacional del Río de la Plata - Río Uruguay, Informe Final. Technical report, Instituto de Mecánica de los Fluidos e Ingeniería Ambiental, Facultad de Ingeniería, Universidad de la República, Montevideo, Uruguay.

Puertos, Vías Navegables y Marina Mercante (2020). Web Institucional de Agenda de Puertos Argentinos. http://www.anp.com.uy/inicio/inicio.

Re, M. and Menéndez, Á. (2004). Estudio de los Corredores de Flujo del Río de la Plata Interior a partir del Modelo de Circulación RPP-2D. Technical report, Instituto Nacional del Agua, Ezeiza, Argentina.

Re, M., Sabarots Gerbec, M., and Storto, L. (2015). Estadística de Niveles en el Delta del río Paraná mediante Modelación Hidrodinámica. Number November, pages 1–13.

Sabarots, M., Badano, N., and Re, M. (2012). Modelación hidro-sedimentológica para la evaluación del avance del frente del delta del río paraná.

Saha, S., Moorthi, S., Pan, H.-L., and Wu, X. (2010). The NCEP climate forecast system reanalysis. *Bulletin of the American Meteorological Society*, (Aug 2010).

Sandbach, A. D., Nicholas, A. P., Ashworth, P. J., Best, J. L., Keevil, C. E., Parsons, D. R., Prokocki, E. W., and Simpson, C. J. (2018). Hydrodynamic modelling of tidal-fluvial flows in a large river estuary. *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, 212(November 2017):176–188.

Santoro, P. (2017). *Numerical modeling of Montevideo Bay hydrodynamics and fine sediment dynamics*. PhD thesis, Facultad de Ingeniería, Universidad de la República.

SOHMA (2009). Proyecto CARU: Levantamiento Integral del Río Uruguay. Technical report, SOHMA, Capurro 980, 11700 Montevideo, Departamento de Montevideo.

SOHMA (2013a). Atlas Cartográfico del Río Uruguay, Serie 700.

SOHMA (2013b). Atlas Cartográfico del Río Uruguay, Serie 800.

SOHMA (2015a). Atlas Cartográfico del Río Uruguay, Serie 900.

SOHMA (2015b). Proyecto CARU: Levantamiento Integral del Río Uruguay. Technical report, SOHMA, Capurro 980, 11700 Montevideo, Departamento de Montevideo.

Szymkiewicz, R. (2010). *Numerical Modeling in Open Channel Hydraulics*. Springer, Faculty of Civil and Environmental Engineering, Gda´nsk University of Technology, Poland.

Tadono, T., Nagai, H., Ishida, H., Oda, F., Naito, S., Minakawa, K., Iwamoto, H., and Radiometer, R. (2016). GENERATION OF THE 30 M-MESH GLOBAL DIGITAL SURFACE MODEL BY ALOS PRISM. *The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, XLI-B4(July):157–162.

Taylor, K. E. (2001). Summarizing multiple aspects of model performance in a single diagram. *JOURNAL OF GEOPHYSICAL RESEARCH*, 106(April):7183–7192.

Te Chow, V. (1982). *Open Channel Hydraulics*. McGraw-Hill International Book Company.

US Geological Survey (2015). USGS EROS Archive - Digital Elevation - Shuttle Radar Topography Mission (SRTM) 1 Arc-Second Global. https://www.usgs.gov/centers/eros/science/usgs-eros-archive-digital-elevation-shuttle-radar-topography-mission-srtm-1-arc?qt-science_center_objects=0#qt-science_center_objects.

Wagner, C. R. and Mueller, D. S. (2001). Calibration and Validation of a Two-Dimensional Hydrodynamic Model of the Ohio River, Jefferson County, Kentucky. Technical report, U.S. Geological Survey, Louisville, Kentucky.

Waichler, S. R., Perkins, W. A., and Richmond, M. C. (2005). Hydrodynamic Simulation of the Columbia River, Hanford Reach, 1940-2004. Technical report, Pacific Northwest National Laboratory, Richland, Washington 99352.

Wilcox, D. (2006). *Turbulence Modeling for CFD*. DCW Industries, 5354 Palm Drive, La Cañada, California 91011.

Wilks, D. S. (2011). *Statistical Mehods in the Atmospheric Sciences*. Academic Press.

Wu, W. (2008). *Computational river dynamics*. Taylor and Francis, 2300 AK Leiden, The Netherlands.

Yakhot, V. (1991). Development of turbulence models for shear flows by a double expansion technique. Contractor Report CR-187611, NASA, NASA Langley Research Center, Hampton, Virginia 23665-5225.

APÉNDICES

Apéndice 1

Procesamiento de datos de nivel

1.1. Introducción

En la presente sección se analiza los registros de niveles de varias estaciones a lo largo del río Uruguay, tanto del lado Uruguayo como del Argentino, así como también en la desembocadura del río Uruguay en el Río de la Plata (ver ubicación de estaciones en figura 1.1). Las estaciones en cuestión se listan a continuación, ordenadas de Norte a Sur: Salto, Concordia, Yeruá, Nueva Escocia, La Calera, Fábrica Colón, Colón, Paysandú, Concepción del Uruguay, Puerto Campichuelo, Gualeguaychú, Fray Bentos, Nueva Palmira, Carmelo y Conchillas. La información utilizada proviene en su gran mayoría de datos proporcionados por la Comisión Administradora del Río Uruguay (CARU) obtenidos, para el lado uruguayo, de registros de la Dirección Nacional de Aguas (DINAGUA), y para el lado argentino de registros de la Dirección Nacional de Vías Navegables (DNVN). Para la obtención de las series finales de datos, se realizó ardua tarea de sistematización de los datos, llevando además todas las mediciones a un mismo sistema de referencia (Plano de Referencia Hidrométrico- Ex Wharton). Cabe destacar que todos los datos de niveles corresponden a después de la construcción del embalse de Salto Grande.

Se realizaron varios análisis sobre las series de niveles disponibles en las estaciones mencionadas, de modo lograr una caracterización y comprensión del comportamiento hidrodinámico del río Uruguay en términos de niveles. Se describe a continuación la información disponible para cada estación, luego la metodología utilizada para el análisis exploratorio de las mismas, presentando luego de esto los resultados para cada estación.

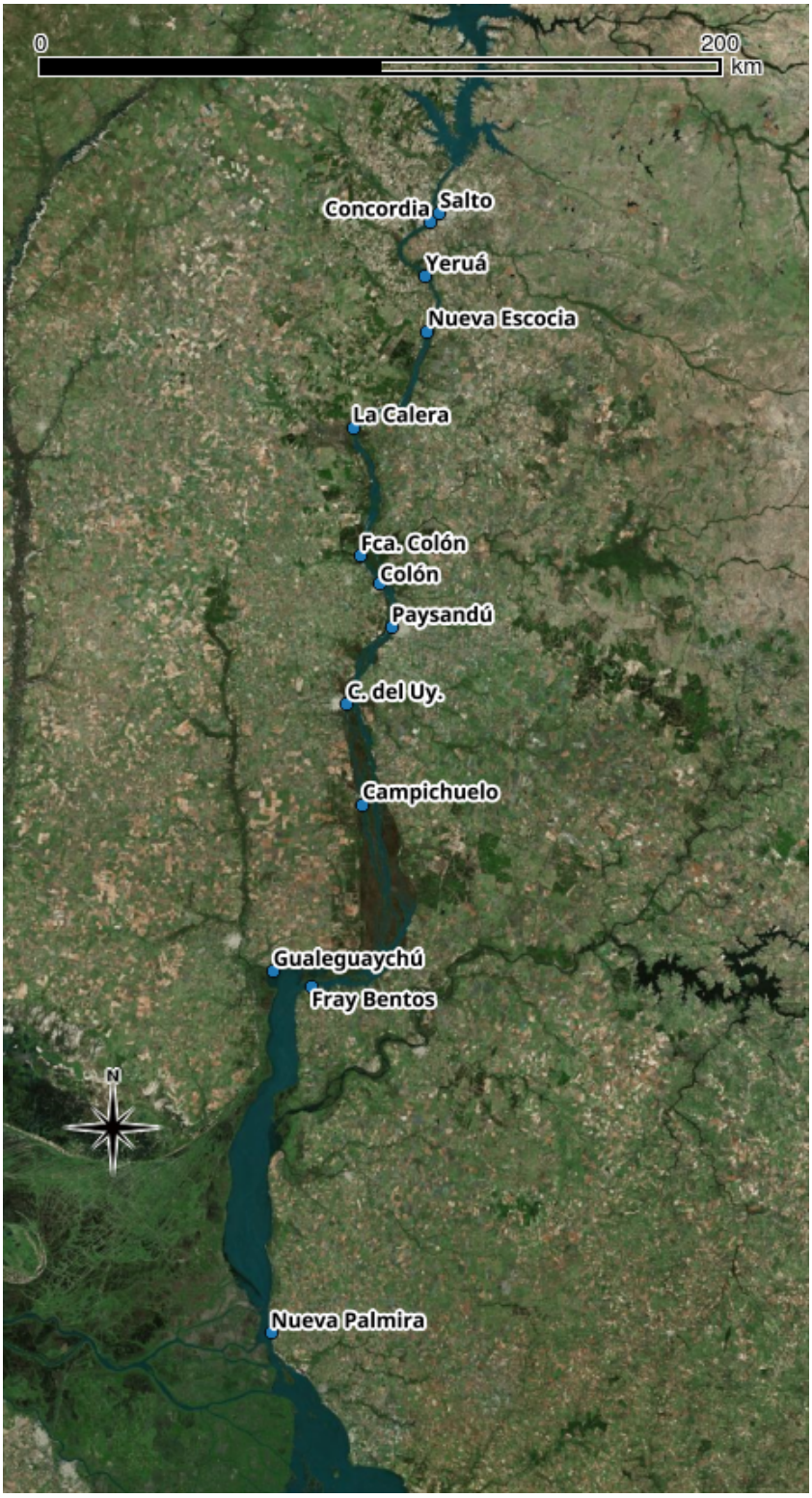


Figura 1.1: Ubicación de estaciones.

Estación	Salto																	
Mes/Año	1980	1981	1982	1983	1984	1985	1986	1987	1988	1989	1990	1991	1992	1993	1994	1995	1996	1997
Enero	31	31	31	31	31	31	31	93	93	124	124	94	124	93	123	124	124	123
Febrero	29	28	28	28	29	28	28	84	87	112	112	84	116	84	112	85	116	85
Marzo	31	31	31	31	31	31	31	93	93	124	124	93	124	93	124	123	124	123
Abril	30	30	30	30	30	30	30	90	90	120	120	90	91	119	120	120	120	120
Mayo	31	31	31	31	31	31	31	93	123	124	124	93	123	186	124	124	124	124
Junio	30	30	30	30	30	30	30	90	121	120	120	90	120	120	120	120	120	120
Julio	31	31	31	31	31	31	31	93	123	124	124	123	124	125	124	124	94	124
Agosto	31	31	31	31	31	31	93	93	124	124	124	124	124	93	124	124	93	94
Setiembre	30	30	30	30	30	30	90	90	120	120	120	120	120	119	120	120	90	90
Octubre	31	31	31	31	31	31	93	93	124	124	124	124	124	94	94	124	93	123
Noviembre	30	30	30	30	30	30	90	90	120	120	120	120	91	90	119	120	90	120
Diciembre	31	31	31	31	31	31	93	93	124	124	124	124	93	93	124	124	93	124

Tabla 1.1: Densidad de datos para Salto - 1.

1.2. Información disponible

Según se mencionó anteriormente, se cuenta con información de las estaciones situadas en Salto, Concordia, Yeruá, Nueva Escocia, La Calera, Fábrica Colón, Colón, Paysandú, Concepción del Uruguay, Puerto Campichuelo, Gualeguaychú, Fray Bentos, Nueva Palmira, Carmelo y Conchillas. En el Apéndice 1.3 se presenta una matriz indicando la densidad de datos por mes y por año para cada una de las estaciones, lo cual permite visualizar los períodos en los que se tiene una buena superposición en los registros. En el Apéndice 1.4 se presenta un análisis global comparativo de las series de niveles, de modo de determinar cualitativamente la calidad de los datos y depurar o corregir las series originales. En esta sección se presentan los datos disponibles sin depurar y se indican las correcciones hechas a los mismos para obtener las series de datos finales a analizar en la sección 1.5.

1.2.1. Salto

La estación Salto se encuentra ubicada en la progresiva 336 km. Los datos para esta estación provienen de registros de DINAGUA y de Salto Grande. Se cuenta con datos desde 1980 hasta 2016 (tablas 1.1 y 1.2). El cero de la escala de esta estación se encuentra a 1,98 m PRH.

1.2.2. Concordia

La estación Concordia se encuentra ubicada en la progresiva 333 km. Los datos para esta estación provienen de registros de DNVN y de Salto Grande. Se cuenta con datos desde 1980 hasta 2015 (tablas 1.3 y 1.4). El cero de la escala de esta estación se encuentra a 1,96 m PRH.

Estación	Salto																	
Mes/Año	1998	1999	2000	2001	2002	2003	2004	2005	2006	2007	2008	2009	2010	2011	2012	2013	2014	2015	2016
Enero	124	94	93	120	93	458	517	744	744	744	744	744	0	1488	0	644	504	666	0
Febrero	112	111	87	111	84	503	539	672	672	672	696	672	0	1344	0	649	324	609	0
Marzo	124	124	93	93	93	245	558	707	744	744	744	744	491	1488	0	519	311	462	0
Abril	123	120	90	90	90	90	370	0	720	720	720	720	720	1440	0	386	175	505	0
Mayo	124	94	93	93	346	93	744	0	744	744	744	744	744	1488	0	636	199	257	0
Junio	120	90	118	90	159	74	720	371	720	719	719	720	720	1440	0	412	192	359	0
Julio	124	123	124	93	319	0	691	744	744	744	744	744	743	1225	0	487	536	343	0
Agosto	124	124	124	93	732	0	545	744	744	744	744	720	744	0	0	426	326	345	0
Setiembre	91	90	120	90	720	0	536	720	720	613	720	720	720	0	0	482	385	489	0
Octubre	123	93	124	93	744	0	701	744	744	0	744	38	744	0	0	464	627	103	0
Noviembre	120	90	120	90	720	335	720	720	720	0	720	0	720	0	0	369	720	0	0
Diciembre	124	93	124	93	331	287	744	744	744	470	744	0	768	0	581	426	561	0	0

Tabla 1.2: Densidad de datos para Salto - 2.

Estación	Concordia																	
Mes/Año	1980	1981	1982	1983	1984	1985	1986	1987	1988	1989	1990	1991	1992	1993	1994	1995	1996	1997
Enero	31	31	31	31	31	31	31	31	31	31	31	31	31	31	31	31	31	31
Febrero	29	28	28	28	29	28	28	28	29	28	28	28	29	28	28	28	29	28
Marzo	31	31	31	31	31	31	31	31	31	31	31	31	31	31	31	31	31	31
Abril	30	30	30	30	30	30	30	30	30	30	30	30	30	30	30	30	30	30
Mayo	31	31	31	31	31	31	31	31	31	31	31	31	31	31	31	31	31	31
Junio	30	30	30	30	30	30	30	30	30	30	30	30	30	30	30	30	30	30
Julio	31	31	31	31	31	31	31	31	31	31	31	31	31	31	31	31	31	31
Agosto	31	31	31	31	31	31	31	31	31	31	31	31	31	31	31	31	31	31
Setiembre	30	30	30	30	30	30	30	30	30	30	30	30	30	30	30	30	30	30
Octubre	31	31	31	31	31	31	31	31	31	31	31	31	31	31	31	31	31	31
Noviembre	30	30	30	30	30	30	30	30	30	30	30	30	30	30	30	30	30	30
Diciembre	31	31	31	31	31	31	31	31	31	31	31	31	31	31	31	31	31	31

Tabla 1.3: Densidad de datos para Concordia - 1.

Estación	Concordia																		
Mes/Año	1998	1999	2000	2001	2002	2003	2004	2005	2006	2007	2008	2009	2010	2011	2012	2013	2014	2015	2016
Enero	31	31	31	31	31	31	31	31	31	31	31	31	31	31	31	743	720	744	0
Febrero	28	28	29	28	28	28	29	28	28	28	29	28	28	28	29	671	624	672	0
Marzo	31	31	31	31	31	31	31	31	31	31	31	31	31	31	31	744	744	744	0
Abril	30	30	30	30	30	30	30	30	30	30	30	30	30	30	30	720	696	570	0
Mayo	31	31	31	31	31	31	31	31	31	31	31	31	31	31	31	742	744	384	0
Junio	30	30	30	30	30	30	30	30	30	30	30	30	30	30	30	720	720	576	0
Julio	31	31	31	31	31	31	31	31	31	31	31	31	31	31	31	744	720	744	0
Agosto	31	31	31	31	31	31	31	31	31	31	31	31	31	31	31	742	744	719	0
Setiembre	30	30	30	30	30	30	30	30	30	30	30	30	30	30	30	720	720	720	0
Octubre	31	31	31	31	31	31	31	31	31	31	31	31	31	31	31	743	719	127	0
Noviembre	30	30	30	30	30	30	30	30	30	30	30	30	30	30	47	719	720	0	0
Diciembre	31	31	31	31	31	31	31	31	31	31	31	31	31	31	741	744	743	0	0

Tabla 1.4: Densidad de datos para Concordia - 2.

Estación	Yeruá																	
Mes/Año	1980	1981	1982	1983	1984	1985	1986	1987	1988	1989	1990	1991	1992	1993	1994	1995	1996	1997
Enero	31	31	31	31	31	31	31	31	31	31	31	31	31	31	31	31	31	31
Febrero	29	28	28	28	29	28	28	28	29	28	28	28	29	28	28	28	29	28
Marzo	31	31	31	31	31	31	31	31	31	31	31	31	31	31	31	31	31	31
Abril	30	29	30	30	30	30	30	30	30	30	30	30	30	30	30	30	30	30
Mayo	31	31	31	31	31	31	31	31	31	31	31	31	31	31	31	31	31	31
Junio	30	30	30	30	30	30	30	30	30	30	30	30	30	30	30	30	30	30
Julio	31	31	31	31	31	31	31	31	31	31	31	31	31	31	31	31	31	31
Agosto	31	31	31	31	31	31	31	31	31	31	31	31	31	31	31	31	31	31
Setiembre	30	30	30	30	30	30	30	30	30	30	30	30	30	30	30	30	30	30
Octubre	31	31	31	31	31	31	31	31	31	31	31	31	31	31	31	31	31	31
Noviembre	30	30	30	30	30	30	30	30	30	30	30	30	30	30	0	30	30	30
Diciembre	31	31	31	31	31	31	31	31	31	31	31	31	31	31	0	31	31	31

Tabla 1.5: Densidad de datos para Yeruá - 1.

Estación	Yeruá																	
Mes/Año	1998	1999	2000	2001	2002	2003	2004	2005	2006	2007	2008	2009	2010	2011	2012	2013	2014	2015	2016
Enero	31	31	12	31	19	31	31	31	31	31	31	31	27	31	31	31	0	0	0
Febrero	28	28	15	28	28	28	29	28	28	28	29	28	27	28	29	28	0	0	0
Marzo	31	31	22	31	31	31	31	31	31	31	31	31	24	31	31	31	0	0	0
Abril	30	30	27	30	30	30	28	30	30	30	30	30	30	30	30	30	0	0	0
Mayo	31	31	29	31	30	31	31	31	31	31	31	31	31	31	31	31	0	0	0
Junio	30	30	27	30	30	30	30	30	30	30	30	30	30	30	30	30	0	0	0
Julio	31	31	30	31	31	31	31	31	31	31	31	31	31	31	31	31	0	0	0
Agosto	31	31	15	31	31	31	31	31	31	31	31	31	31	31	31	31	0	0	0
Setiembre	30	30	28	30	30	30	30	30	30	30	30	30	30	30	30	30	0	0	0
Octubre	31	31	31	31	31	31	31	31	31	31	31	31	31	31	31	31	0	0	0
Noviembre	30	30	30	30	30	29	30	30	30	30	30	30	30	30	30	30	0	0	0
Diciembre	31	31	31	31	31	31	31	31	31	31	31	22	31	31	31	31	0	0	0

Tabla 1.6: Densidad de datos para Yeruá - 2.

1.2.3. Yeruá

La estación Yeruá se encuentra ubicada en la progresiva 311 km. Los datos para esta estación provienen de registros de DNVN. Se cuenta con datos desde 1980 hasta 2013 (tablas 1.5 y 1.6). El cero de la escala de esta estación se encuentra a 1,15 m PRH.

1.2.4. Nueva Escocia

La estación Nueva Escocia se encuentra ubicada en la progresiva 295 km. Los datos para esta estación provienen de registros de DNVN. Se cuenta con datos desde 1980 hasta 2013 (tablas 1.7 y 1.8). El cero de la escala de esta estación se encuentra a 1,27 m PRH.

Estación	Nueva Escocia																	
Mes/Año	1980	1981	1982	1983	1984	1985	1986	1987	1988	1989	1990	1991	1992	1993	1994	1995	1996	1997
Enero	31	31	31	31	18	31	0	31	31	31	31	31	0	0	31	31	31	31
Febrero	29	28	28	28	29	26	28	28	29	28	28	28	29	0	28	28	29	28
Marzo	31	31	31	31	31	31	31	31	31	31	31	31	31	0	31	31	31	31
Abril	30	30	30	30	30	30	30	30	30	30	30	30	30	30	30	0	30	30
Mayo	31	31	31	31	31	31	15	31	31	31	31	31	31	31	31	31	31	31
Junio	30	30	30	30	30	30	30	30	30	30	30	0	30	30	30	0	30	30
Julio	31	31	31	31	31	31	31	31	31	31	31	31	31	31	31	31	31	31
Agosto	31	31	31	31	31	31	31	31	31	31	31	31	31	0	31	31	31	31
Setiembre	30	30	30	30	30	30	30	30	30	30	30	30	30	30	30	30	30	30
Octubre	31	31	31	31	31	31	31	31	31	31	31	0	0	31	31	31	31	31
Noviembre	30	30	30	30	30	30	28	30	16	30	30	0	0	30	30	30	30	30
Diciembre	31	31	31	31	31	0	31	31	31	31	31	0	0	31	31	31	31	31

Tabla 1.7: Densidad de datos para Nueva Escocia - 1.

Estación	Nueva Escocia																	
Mes/Año	1998	1999	2000	2001	2002	2003	2004	2005	2006	2007	2008	2009	2010	2011	2012	2013	2014	2015	2016
Enero	31	31	31	31	31	31	31	31	31	31	31	31	31	31	31	31	0	0	0
Febrero	28	28	29	28	28	28	29	28	28	28	29	28	28	28	29	28	0	0	0
Marzo	31	31	0	31	31	31	31	31	31	31	31	31	31	31	31	31	0	0	0
Abril	30	30	0	30	30	30	30	30	30	30	30	30	30	30	30	30	0	0	0
Mayo	31	31	0	31	31	31	31	31	31	31	31	31	31	31	31	31	0	0	0
Junio	30	30	30	30	30	30	30	30	30	0	30	30	30	30	0	30	0	0	0
Julio	31	31	31	31	31	31	0	31	31	31	31	31	31	31	31	31	0	0	0
Agosto	31	31	31	31	31	31	31	31	31	31	31	31	31	31	31	31	0	0	0
Setiembre	30	30	30	30	30	30	30	30	30	30	30	30	30	30	30	30	0	0	0
Octubre	31	31	31	31	31	31	31	31	31	31	31	31	31	31	31	0	0	0	0
Noviembre	30	30	30	30	30	30	30	30	30	30	30	30	30	30	30	0	0	0	0
Diciembre	31	31	31	31	31	0	31	31	31	31	31	24	31	31	31	0	0	0	0

Tabla 1.8: Densidad de datos para Nueva Escocia - 2.

Estación	La Calera																		
Mes/Año	1995	1996	1997	1998	1999	2000	2001	2002	2003	2004	2005	2006	2007	2008	2009	2010	2011	2012	2013
Enero	0	31	31	31	31	31	31	31	31	31	31	31	31	31	31	31	31	31	31
Febrero	0	29	28	28	28	29	28	28	28	29	28	28	28	29	28	28	28	29	28
Marzo	31	31	31	31	31	31	31	31	31	31	31	31	31	31	31	31	31	31	31
Abril	30	30	30	30	30	30	30	30	30	30	30	30	30	30	30	30	30	30	30
Mayo	31	31	31	31	31	31	31	31	31	31	31	31	31	31	31	31	31	31	31
Junio	30	30	30	30	30	30	30	30	30	30	30	30	30	30	30	30	30	30	30
Julio	31	31	31	31	31	31	31	31	31	31	31	31	31	31	31	31	31	31	31
Agosto	31	31	31	31	31	31	31	31	31	31	31	31	31	31	31	31	31	31	31
Setiembre	30	30	30	30	30	30	30	30	30	30	30	30	30	30	30	30	30	30	30
Octubre	31	31	31	31	31	31	31	31	31	31	31	31	31	31	31	31	31	31	31
Noviembre	30	30	30	30	30	30	30	30	30	30	30	30	30	30	30	30	30	30	30
Diciembre	31	31	31	31	31	31	31	31	31	31	31	31	31	31	31	31	31	31	31

Tabla 1.9: Densidad de datos para La Calera.

Estación	Fábrica Colón																	
Mes/Año	1980	1981	1982	1983	1984	1985	1986	1987	1988	1989	1990	1991	1992	1993	1994	1995	1996	1997
Enero	31	31	31	31	31	31	31	31	31	31	31	31	31	31	31	31	31	31
Febrero	29	28	28	28	29	28	28	28	29	28	28	28	29	28	28	28	29	28
Marzo	31	31	31	31	31	31	31	31	31	31	31	31	31	31	31	31	31	31
Abril	30	30	30	30	30	30	30	30	30	30	30	30	30	30	30	30	30	30
Mayo	31	31	31	31	31	31	31	31	31	31	31	31	31	31	31	31	31	31
Junio	30	30	30	30	30	30	30	30	30	30	30	30	30	30	30	30	30	30
Julio	31	31	31	31	31	31	31	31	31	31	31	31	31	31	31	31	31	31
Agosto	31	31	31	31	31	31	31	31	24	31	31	31	31	31	31	31	31	31
Setiembre	30	30	30	30	30	30	30	30	16	30	30	30	30	30	30	30	30	30
Octubre	31	31	31	31	31	31	31	31	31	31	31	31	31	31	31	31	31	16
Noviembre	30	30	30	30	30	30	30	30	30	30	30	30	30	30	30	30	30	0
Diciembre	31	31	31	31	31	31	31	31	31	31	31	31	31	31	31	31	31	19

Tabla 1.10: Densidad de datos para Fábrica Colón - 1.

1.2.5. La Calera

La estación La Calera se encuentra ubicada en la progresiva 260 km. Los datos para esta estación provienen de registros de DNVN. Se cuenta con datos desde 1995 hasta 2013 (tabla 1.9). El cero de la escala de esta estación se encuentra a 1,14 m PRH.

1.2.6. Fábrica Colón

La estación Fábrica Colón se encuentra ubicada en la progresiva 228 km. Los datos para esta estación provienen de registros de DNVN. Se cuenta con datos desde 1980 hasta 2013 (tablas 1.10 y 1.11). El cero de la escala de esta estación se encuentra a 0,63 m PRH.

Estación	Fábrica Colón																		
Mes/Año	1998	1999	2000	2001	2002	2003	2004	2005	2006	2007	2008	2009	2010	2011	2012	2013	2014	2015	2016
Enero	18	31	0	31	0	31	31	31	31	31	31	31	31	31	31	31	0	0	0
Febrero	0	28	0	28	17	28	29	28	28	28	29	28	28	28	29	28	0	0	0
Marzo	24	31	0	31	31	31	31	31	31	31	31	31	31	31	31	31	0	0	0
Abril	17	30	28	30	30	30	30	30	30	30	30	30	30	30	30	30	0	0	0
Mayo	19	31	29	31	31	31	31	31	31	31	31	31	31	31	31	31	0	0	0
Junio	30	30	27	30	30	30	30	30	30	30	30	30	30	30	30	0	0	0	0
Julio	31	31	31	31	31	31	31	31	31	31	31	31	31	31	31	0	0	0	0
Agosto	31	31	17	31	31	31	31	31	31	31	31	31	31	31	31	0	0	0	0
Setiembre	30	30	23	30	30	30	30	30	30	30	30	30	30	30	30	0	0	0	0
Octubre	31	31	31	31	22	31	31	31	31	31	31	31	31	31	31	0	0	0	0
Noviembre	30	22	30	28	30	30	30	30	30	30	30	25	30	30	30	0	0	0	0
Diciembre	31	0	31	0	26	31	31	31	31	31	31	23	31	31	31	0	0	0	0

Tabla 1.11: Densidad de datos para Fábrica Colón - 2.

Estación	Colón																	
Mes/Año	1980	1981	1982	1983	1984	1985	1986	1987	1988	1989	1990	1991	1992	1993	1994	1995	1996	1997
Enero	31	31	31	31	31	31	31	31	31	31	31	31	31	31	31	31	31	31
Febrero	29	28	28	28	29	28	28	28	29	28	28	28	29	28	28	28	29	28
Marzo	31	31	31	31	31	31	31	31	31	31	31	31	31	31	31	31	31	31
Abril	30	30	30	30	30	30	30	30	30	30	30	30	30	30	30	30	30	30
Mayo	31	31	31	31	31	31	31	31	31	31	31	31	31	31	31	31	31	31
Junio	30	30	30	30	30	30	30	30	30	30	30	30	30	30	30	30	30	30
Julio	31	31	31	31	31	31	31	31	31	31	31	31	31	31	31	31	31	31
Agosto	31	31	31	31	31	31	31	31	31	31	31	31	31	31	31	31	31	31
Setiembre	30	30	30	30	30	30	30	30	30	30	30	30	30	30	30	30	30	30
Octubre	31	31	31	31	31	31	31	31	31	31	31	31	31	31	31	31	31	31
Noviembre	30	30	30	30	30	30	30	30	30	30	30	30	30	30	30	30	30	30
Diciembre	31	31	31	31	31	31	31	31	31	31	31	31	31	31	31	31	31	31

Tabla 1.12: Densidad de datos para Colón - 1.

1.2.7. Colón

La estación Colón se encuentra ubicada en la progresiva 219,6 km. Los datos para esta estación provienen de registros de DNVN y Salto Grande. Se cuenta con datos desde 1980 hasta 2015 (tablas 1.12 y 1.13). El cero de la escala de esta estación se encuentra a 0,59 m PRH.

1.2.8. Paysandú

La estación Paysandú se encuentra ubicada en la progresiva 206,8 km. Los datos para esta estación provienen de registros de DINAGUA y Salto Grande. Se cuenta con datos desde 1980 hasta 2016 (tablas 1.14 y 1.15). El cero de la escala de esta estación se encuentra a 1,02 m PRH.

Estación	Colón																		
Mes/Año	1998	1999	2000	2001	2002	2003	2004	2005	2006	2007	2008	2009	2010	2011	2012	2013	2014	2015	2016
Enero	31	31	31	31	31	31	31	31	31	31	31	31	31	31	31	743	720	744	0
Febrero	28	28	29	28	28	28	29	28	28	28	29	28	28	28	29	671	624	672	0
Marzo	31	31	31	31	31	31	31	31	31	31	31	31	31	31	31	744	744	741	0
Abril	30	30	30	30	30	30	30	30	30	30	30	30	30	30	30	720	696	570	0
Mayo	31	31	26	31	31	31	31	31	31	31	31	31	31	31	31	742	744	384	0
Junio	30	30	30	30	30	30	30	30	30	30	30	30	30	30	30	720	720	600	0
Julio	31	31	31	31	31	31	31	31	31	31	31	31	31	31	31	744	720	744	0
Agosto	31	31	31	31	31	31	31	31	31	31	31	31	31	31	31	742	744	719	0
Setiembre	30	30	30	30	30	30	30	30	30	30	30	30	30	30	30	720	720	720	0
Octubre	31	31	31	31	31	31	31	31	31	31	31	31	31	31	31	743	719	127	0
Noviembre	30	30	30	30	30	30	30	30	30	30	30	30	30	30	47	719	720	0	0
Diciembre	31	31	31	31	31	31	31	31	31	30	31	31	31	31	741	744	696	0	0

Tabla 1.13: Densidad de datos para Colón - 2.

Estación	Paysandú																	
Mes/Año	1980	1981	1982	1983	1984	1985	1986	1987	1988	1989	1990	1991	1992	1993	1994	1995	1996	1997
Enero	93	93	93	93	93	93	93	93	93	124	94	123	744	115	129	744	744	744
Febrero	87	84	84	84	87	84	84	84	87	112	84	112	696	89	110	672	696	672
Marzo	93	93	93	93	93	93	93	93	93	124	93	124	744	124	124	744	744	744
Abril	90	90	90	90	90	90	90	90	90	120	90	120	499	123	120	718	720	720
Mayo	93	93	93	93	93	93	93	93	93	124	93	124	667	126	124	744	744	744
Junio	90	90	90	90	90	90	90	90	90	117	90	120	714	120	120	720	720	720
Julio	93	93	93	93	93	93	93	93	93	124	93	124	598	124	124	692	744	744
Agosto	93	93	93	93	93	93	93	93	123	124	93	124	743	124	124	743	744	744
Setiembre	90	90	90	90	90	90	90	90	120	120	90	120	662	120	120	720	720	720
Octubre	93	93	93	93	93	93	93	93	124	124	93	124	744	124	124	94	744	744
Noviembre	90	90	90	90	90	90	90	90	91	120	90	120	720	90	118	90	720	720
Diciembre	93	93	93	93	93	93	93	93	123	124	93	124	744	124	119	743	744	744

Tabla 1.14: Densidad de datos para Paysandú - 1.

Estación	Paysandú																		
Mes/Año	1998	1999	2000	2001	2002	2003	2004	2005	2006	2007	2008	2009	2010	2011	2012	2013	2014	2015	2016
Enero	744	744	1	519	744	687	743	0	744	744	744	744	744	1488	1488	1432	763	744	744
Febrero	672	672	0	671	672	672	696	0	563	672	696	672	672	1344	1392	722	652	672	696
Marzo	744	744	0	744	744	744	744	0	665	744	744	744	744	1488	1488	545	651	722	733
Abril	720	720	0	720	720	720	718	0	720	720	719	720	720	1440	1440	417	511	720	720
Mayo	744	744	0	398	744	744	744	0	730	744	744	744	744	1488	1488	712	593	744	744
Junio	720	720	0	719	697	720	720	0	720	720	720	720	720	1439	1440	668	283	714	144
Julio	744	744	0	744	743	744	1	0	744	744	744	744	744	1488	1488	594	1	744	0
Agosto	744	744	743	744	744	744	0	663	744	744	744	744	744	1488	1488	692	0	744	0
Setiembre	719	1	720	720	720	720	0	719	720	720	720	719	720	1440	1440	649	603	626	0
Octubre	744	743	744	744	744	744	0	744	744	744	744	744	744	1488	1488	613	744	392	0
Noviembre	720	720	720	720	720	720	0	275	720	720	720	720	720	1439	1440	377	720	401	0
Diciembre	744	744	744	744	744	744	0	460	744	744	744	744	768	1488	1488	622	744	666	0

Tabla 1.15: Densidad de datos para Paysandú - 2.

Estación	Concepción del Uruguay																	
Mes/Año	1980	1981	1982	1983	1984	1985	1986	1987	1988	1989	1990	1991	1992	1993	1994	1995	1996	1997
Enero	0	0	31	31	31	31	31	31	31	31	31	31	31	31	31	31	31	31
Febrero	0	0	28	28	29	28	28	28	29	28	28	28	28	28	28	28	28	28
Marzo	0	0	31	31	31	31	31	31	31	31	31	31	31	31	31	31	31	31
Abril	0	0	30	30	30	30	30	30	30	30	30	30	30	30	30	30	30	30
Mayo	0	0	31	31	31	31	31	31	31	31	31	31	31	31	31	31	31	31
Junio	0	0	30	30	30	30	30	30	30	30	30	30	30	30	30	30	30	30
Julio	0	0	31	31	31	31	31	31	31	31	31	31	31	31	31	31	31	31
Agosto	0	0	31	31	31	31	31	31	31	31	31	31	31	31	31	31	31	31
Setiembre	0	0	30	30	30	30	30	30	30	30	30	30	30	30	30	30	30	30
Octubre	0	0	31	31	31	31	31	31	31	31	31	31	31	31	31	31	31	31
Noviembre	0	0	30	30	30	30	30	30	30	30	30	30	30	30	30	30	30	30
Diciembre	0	0	31	31	31	31	31	31	31	31	31	31	31	31	31	31	31	31

Tabla 1.16: Densidad de datos para Concepción del Uruguay - 1.

Estación	Concepción del Uruguay																	
Mes/Año	1998	1999	2000	2001	2002	2003	2004	2005	2006	2007	2008	2009	2010	2011	2012	2013	2014	2015	2016
Enero	31	31	31	31	31	31	31	31	31	31	31	31	31	31	0	738	0	744	0
Febrero	28	28	29	28	28	28	29	28	28	28	29	28	28	28	0	671	159	649	0
Marzo	31	31	31	31	31	31	31	31	31	31	31	31	31	31	0	744	744	720	0
Abril	30	30	30	30	30	30	30	30	30	30	30	30	30	30	0	720	696	558	0
Mayo	31	31	31	31	31	31	31	31	31	31	31	31	31	31	0	741	744	384	0
Junio	30	30	30	30	30	30	30	30	30	30	30	30	30	30	0	720	720	570	0
Julio	31	31	31	31	31	31	31	31	31	31	31	31	31	31	0	744	719	744	0
Agosto	31	31	31	31	31	31	31	31	31	31	31	31	31	31	0	742	744	719	0
Setiembre	30	30	30	30	30	30	30	30	30	30	30	30	30	30	0	720	696	720	0
Octubre	31	31	31	31	31	31	31	31	31	31	31	31	31	31	0	743	720	127	0
Noviembre	30	30	30	30	30	30	30	30	30	30	30	30	30	30	17	719	720	0	0
Diciembre	31	31	31	31	31	31	31	31	31	31	31	31	31	31	741	698	690	0	0

Tabla 1.17: Densidad de datos para Concepción del Uruguay - 2.

1.2.9. Concepción del Uruguay

La estación Concepción del Uruguay se encuentra ubicada en la progresiva 186,6 km. Los datos para esta estación provienen de registros de DNVN y Salto Grande. Se cuenta con datos desde 1995 hasta 2015 (tablas 1.16 y 1.17). El cero de la escala de esta estación se encuentra a 0,61 m PRH.

1.2.10. Campichuelo

La estación Campichuelo se encuentra ubicada en la progresiva 160,6 km. Los datos para esta estación provienen de registros de DNVN. Se cuenta con datos desde 1982 hasta 2011 (tablas 1.18 y 1.19). El cero de la escala de esta estación se encuentra a 0,58 m PRH.

Estación	Campichuelo																	
Mes/Año	1980	1981	1982	1983	1984	1985	1986	1987	1988	1989	1990	1991	1992	1993	1994	1995	1996	1997
Enero	0	0	31	31	31	31	31	31	31	31	31	31	31	31	30	31	31	31
Febrero	0	0	28	28	29	28	28	28	29	28	28	28	28	28	28	28	29	28
Marzo	0	0	31	31	31	31	31	31	31	30	31	31	31	31	31	31	31	31
Abril	0	0	30	29	27	30	30	30	30	30	30	30	30	30	30	30	30	30
Mayo	0	0	31	31	30	31	31	31	31	31	31	31	31	30	31	31	31	31
Junio	0	0	29	30	30	29	30	30	30	30	17	30	30	30	30	30	30	30
Julio	0	0	31	31	31	31	31	31	31	31	31	31	31	31	31	31	31	31
Agosto	0	0	31	31	31	31	31	31	31	30	31	31	31	31	31	31	31	31
Setiembre	0	0	30	30	30	30	30	30	30	30	30	30	30	30	30	30	30	30
Octubre	0	0	31	31	31	31	31	31	31	31	31	31	31	31	31	31	31	18
Noviembre	0	0	27	29	30	30	30	30	30	30	30	30	30	30	30	30	30	0
Diciembre	0	0	0	31	31	31	31	31	31	31	31	31	31	31	31	31	31	31

Tabla 1.18: Densidad de datos para Campichuelo - 1.

Estación	Campichuelo																	
Mes/Año	1998	1999	2000	2001	2002	2003	2004	2005	2006	2007	2008	2009	2010	2011	2012	2013	2014	2015	2016
Enero	31	31	31	31	31	31	31	31	31	31	31	31	31	31	0	0	0	0	0
Febrero	28	28	29	28	28	28	27	28	28	28	29	28	28	28	0	0	0	0	0
Marzo	31	31	31	31	31	31	31	31	31	31	31	29	31	31	0	0	0	0	0
Abril	30	30	30	30	30	30	30	30	30	30	28	30	30	30	0	0	0	0	0
Mayo	31	31	30	28	30	31	31	31	31	31	31	31	31	31	0	0	0	0	0
Junio	30	30	9	29	30	30	30	30	30	30	30	30	30	30	0	0	0	0	0
Julio	31	31	0	28	31	31	31	31	31	31	31	31	31	31	0	0	0	0	0
Agosto	31	31	15	30	31	31	31	31	31	31	31	31	31	31	0	0	0	0	0
Setiembre	30	30	30	30	28	28	30	30	30	30	30	30	30	30	0	0	0	0	0
Octubre	31	31	31	31	31	26	31	31	31	31	31	31	30	31	0	0	0	0	0
Noviembre	30	30	30	30	30	30	30	30	30	29	30	30	30	29	0	0	0	0	0
Diciembre	31	31	31	31	28	31	31	31	31	30	31	31	31	31	0	0	0	0	0

Tabla 1.19: Densidad de datos para Campichuelo - 2.

Estación	Fray Bentos																	
Mes/Año	1980	1981	1982	1983	1984	1985	1986	1987	1988	1989	1990	1991	1992	1993	1994	1995	1996	1997
Enero	0	722	0	93	93	93	93	727	706	707	744	744	94	93	736	32	736	714
Febrero	0	665	0	84	87	84	84	645	676	659	658	672	87	84	672	28	684	644
Marzo	0	731	0	93	93	93	93	744	613	726	674	737	93	93	744	31	1	713
Abril	0	712	0	90	90	90	30	703	571	720	720	551	90	90	720	30	688	719
Mayo	0	1	0	93	93	93	93	744	736	744	712	641	93	93	744	31	744	744
Junio	0	0	0	90	90	90	90	685	671	678	661	720	90	90	688	26	720	720
Julio	0	0	0	93	93	93	93	703	727	241	730	744	93	93	744	25	744	744
Agosto	0	0	0	93	93	93	720	722	744	541	744	744	93	93	744	29	744	743
Setiembre	0	0	90	90	90	90	635	697	168	0	673	641	90	90	713	30	720	720
Octubre	0	0	93	93	93	93	743	726	640	0	615	740	93	93	737	31	721	737
Noviembre	0	0	90	90	90	90	668	699	720	0	720	720	90	90	713	29	720	720
Diciembre	0	0	93	93	93	93	722	737	731	236	728	744	93	93	744	31	744	744

Tabla 1.20: Densidad de datos para Fray Bentos - 1.

Estación	Fray Bentos																	
Mes/Año	1998	1999	2000	2001	2002	2003	2004	2005	2006	2007	2008	2009	2010	2011	2012	2013	2014	2015	2016
Enero	663	743	583	392	579	403	453	744	744	744	744	744	744	0	0	644	502	665	0
Febrero	672	672	527	346	519	324	482	672	648	672	696	672	672	0	0	649	328	610	0
Marzo	744	744	550	464	549	149	560	744	744	744	744	744	744	0	0	520	320	462	0
Abril	659	720	414	394	305	382	545	720	720	720	720	720	719	0	0	385	175	505	0
Mayo	634	743	419	231	174	189	542	744	744	744	744	744	744	0	0	636	199	257	0
Junio	720	712	373	304	30	331	457	720	720	720	720	720	373	0	0	412	192	359	0
Julio	744	744	315	375	55	406	222	744	720	744	744	744	0	0	0	487	535	342	0
Agosto	744	557	448	443	259	464	544	744	744	744	720	744	0	0	0	426	326	345	0
Setiembre	720	438	371	401	282	485	550	720	720	719	720	720	227	0	0	482	385	489	0
Octubre	744	366	317	267	409	519	489	744	744	744	744	744	744	0	0	465	626	103	0
Noviembre	720	526	406	434	262	453	411	720	720	720	720	720	720	0	0	370	718	0	0
Diciembre	744	571	558	546	358	374	627	744	744	744	720	744	721	0	581	426	562	0	0

Tabla 1.21: Densidad de datos para Fray Bentos - 2.

1.2.11. Fray Bentos

La estación Fray Bentos se encuentra ubicada en la progresiva 98,7 km. Los datos para esta estación provienen de registros de DINAGUA y Salto Grande. Se cuenta con datos desde 1981 hasta 2015 (tablas 1.20 y 1.21). El cero de la escala de esta estación se encuentra a 0,55 m PRH.

1.2.12. Gualeguaychú

La estación Gualeguaychú se encuentra ubicada en la progresiva 93,8 km. Los datos para esta estación provienen de registros de DNVN. Se cuenta con datos desde 1982 hasta 2011 (tablas 1.22 y 1.23). El cero de la escala de esta estación se encuentra a 0,51 m PRH.

Estación	Gualeguaychú																	
Mes/Año	1980	1981	1982	1983	1984	1985	1986	1987	1988	1989	1990	1991	1992	1993	1994	1995	1996	1997
Enero	0	0	31	31	31	0	31	31	31	31	31	31	31	31	31	31	31	31
Febrero	0	0	28	27	29	0	27	28	29	28	28	28	28	26	28	28	29	28
Marzo	0	0	31	31	31	0	31	31	31	31	31	31	31	31	31	31	31	31
Abril	0	0	30	30	30	0	0	30	30	30	30	30	30	30	30	30	30	30
Mayo	0	0	31	31	30	0	29	31	31	31	31	31	31	31	31	31	31	31
Junio	0	0	30	30	30	0	30	30	30	30	30	30	30	30	30	30	30	30
Julio	0	0	31	23	31	0	31	31	31	31	31	31	31	31	31	31	31	31
Agosto	0	0	31	31	31	0	31	31	31	31	31	31	31	31	31	31	31	31
Setiembre	0	0	30	30	30	0	30	30	30	30	30	30	30	29	30	30	30	30
Octubre	0	0	31	31	31	0	31	31	31	31	31	31	31	31	31	31	31	31
Noviembre	0	0	30	30	30	0	21	30	30	30	30	30	30	30	30	30	30	30
Diciembre	0	0	31	31	31	0	0	31	31	31	31	31	31	31	31	31	31	31

Tabla 1.22: Densidad de datos para Gualeguaychú - 1.

Estación	Gualeguaychú																	
Mes/Año	1998	1999	2000	2001	2002	2003	2004	2005	2006	2007	2008	2009	2010	2011	2012	2013	2014	2015	2016
Enero	29	31	31	31	31	31	31	31	31	31	31	31	31	31	0	0	0	0	0
Febrero	28	28	29	28	28	28	29	28	28	28	29	28	28	28	0	0	0	0	0
Marzo	31	31	31	31	31	31	31	31	31	31	31	31	31	31	0	0	0	0	0
Abril	30	30	30	30	30	30	30	30	30	30	30	30	30	30	0	0	0	0	0
Mayo	31	31	31	31	31	31	31	31	31	31	31	31	31	31	0	0	0	0	0
Junio	30	30	30	30	30	30	30	30	30	30	30	30	30	30	0	0	0	0	0
Julio	31	31	31	31	31	31	31	31	31	31	31	31	31	31	0	0	0	0	0
Agosto	31	31	31	31	31	31	31	31	31	31	31	31	31	31	0	0	0	0	0
Setiembre	30	30	30	30	30	30	30	30	30	30	30	30	30	30	0	0	0	0	0
Octubre	31	31	31	31	31	31	31	31	31	31	31	31	31	31	0	0	0	0	0
Noviembre	30	30	30	30	30	30	30	30	30	30	30	30	30	30	0	0	0	0	0
Diciembre	31	31	31	31	31	31	31	31	31	31	31	31	31	31	0	0	0	0	0

Tabla 1.23: Densidad de datos para Gualeguaychú - 2.

Estación	Nueva Palmira																	
Mes/Año	1980	1981	1982	1983	1984	1985	1986	1987	1988	1989	1990	1991	1992	1993	1994	1995	1996	1997
Enero	743	62	62	62	743	726	62	612	637	744	695	622	720	744	744	744	735	744
Febrero	696	56	56	56	696	672	56	672	696	644	672	604	695	672	672	672	696	672
Marzo	63	62	62	62	1	744	62	744	744	511	718	744	744	32	744	744	744	744
Abril	60	60	60	60	0	720	60	720	720	654	712	720	720	719	720	663	351	720
Mayo	62	62	62	62	743	547	62	744	744	370	744	744	744	744	744	744	637	744
Junio	60	60	60	60	720	175	60	720	720	720	720	720	720	720	720	720	490	720
Julio	62	62	62	62	744	744	54	744	744	741	551	744	744	744	744	744	45	744
Agosto	62	62	62	62	744	1	529	744	744	665	537	744	744	709	744	744	4	744
Setiembre	60	60	60	60	715	0	624	720	646	719	700	314	720	424	720	720	11	720
Octubre	62	62	62	62	1	0	563	744	725	720	693	705	744	744	744	1	744	717
Noviembre	60	60	60	60	719	719	680	720	720	708	551	720	720	720	720	0	720	710
Diciembre	62	62	62	62	744	1	676	744	723	744	730	717	744	744	744	0	744	658

Tabla 1.24: Densidad de datos para Nueva Palmira - 1.

Estación	Nueva Palmira																	
Mes/Año	1998	1999	2000	2001	2002	2003	2004	2005	2006	2007	2008	2009	2010	2011	2012	2013	2014	2015	2016
Enero	744	744	744	0	0	744	744	744	744	474	440	504	331	0	0	644	505	665	0
Febrero	672	672	696	0	0	672	696	672	672	398	438	438	246	0	0	649	327	610	0
Marzo	744	693	744	0	0	744	744	744	744	344	457	464	306	0	0	518	320	462	0
Abril	576	697	720	0	0	720	720	720	720	296	434	464	327	0	0	385	175	505	0
Mayo	744	743	744	0	350	744	744	744	744	293	452	518	313	0	0	636	199	256	0
Junio	582	720	720	0	720	720	720	720	720	283	395	474	298	0	0	411	192	359	0
Julio	744	744	744	0	744	744	744	744	744	367	428	442	340	0	0	487	536	342	0
Agosto	744	615	744	0	744	744	744	744	562	350	397	340	491	0	0	425	326	345	0
Setiembre	677	680	518	0	720	720	720	720	420	392	393	335	720	0	0	481	385	489	0
Octubre	744	744	0	0	744	744	744	744	454	365	405	343	744	0	0	465	627	103	0
Noviembre	720	720	0	0	720	720	720	720	412	414	348	323	709	0	0	367	719	0	0
Diciembre	744	744	0	0	744	744	744	744	440	453	444	231	436	0	581	424	562	0	0

Tabla 1.25: Densidad de datos para Nueva Palmira - 2.

1.2.13. Nueva Palmira

La estación Nueva Palmira se encuentra ubicada en la progresiva 4,1 km. Los datos para esta estación provienen de registros de DINAGUA y Salto Grande. Se cuenta con datos desde 1980 hasta 2015 (tablas 1.24 y 1.25). El cero de la escala de esta estación se encuentra a 0,72 m PRH.

1.2.14. Carmelo

La estación Carmelo se encuentra ubicada en Puerto Carmelo, ya en aguas del Río de la Plata. Los datos para esta estación provienen de registros de DINAGUA. Se cuenta con datos desde 2004 hasta 2007 (tabla 1.26). El cero de la escala de esta estación se encuentra a 0,76 m PRH. Los datos para esta estación son escasos y dispersos.

Estación	Carmelo																		
Mes/Año	1998	1999	2000	2001	2002	2003	2004	2005	2006	2007	2008	2009	2010	2011	2012	2013	2014	2015	2016
Enero	0	0	0	0	0	0	93	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Febrero	0	0	0	0	0	0	87	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Marzo	0	0	0	0	0	0	93	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Abril	0	0	0	0	0	0	90	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Mayo	0	0	0	0	0	0	93	0	0	93	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Junio	0	0	0	0	0	0	90	0	90	87	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Julio	0	0	0	0	0	0	90	0	90	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Agosto	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Setiembre	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Octubre	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Noviembre	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Diciembre	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0

Tabla 1.26: Densidad de datos para Carmelo.

Estación	Conchillas																		
Mes/Año	1998	1999	2000	2001	2002	2003	2004	2005	2006	2007	2008	2009	2010	2011	2012	2013	2014	2015	2016
Enero	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	742	717	0	0	0	0	0	0	0
Febrero	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	686	670	0	0	0	0	0	0	0
Marzo	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	744	739	0	0	0	0	0	0	0
Abril	0	0	0	0	0	0	0	0	0	653	720	464	0	0	0	0	0	0	0
Mayo	0	0	0	0	0	0	0	0	0	744	744	596	0	0	0	0	0	0	0
Junio	0	0	0	0	0	0	0	0	0	720	720	720	0	0	0	0	0	0	0
Julio	0	0	0	0	0	0	0	0	0	744	744	744	0	0	0	0	0	0	0
Agosto	0	0	0	0	0	0	0	0	0	744	736	744	0	0	0	0	0	0	0
Setiembre	0	0	0	0	0	0	0	0	0	346	695	720	0	0	0	0	0	0	0
Octubre	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	744	744	0	0	0	0	0	0	0
Noviembre	0	0	0	0	0	0	0	0	0	264	720	720	0	0	0	0	0	0	0
Diciembre	0	0	0	0	0	0	0	0	0	744	738	744	0	0	0	0	0	0	0

Tabla 1.27: Densidad de datos para Conchillas.

1.2.15. Conchillas

La estación Conchillas se encuentra ubicada en el Puerto de Conchillas. Los datos para esta estación provienen de registros de DINAGUA. Se cuenta con datos desde 2007 hasta 2009 (tabla 1.27). El cero de la escala de esta estación se encuentra a 0,60 m PRH. Los datos para esta estación son escasos y dispersos.

1.3. Densidad de datos depurados

1.3.1. Matriz de densidad de datos mensuales depurados

FECHA	SALTO	CONC.	YERUÁ	N. ESCOCIA	LA CALERA	FCA. COLÓN	COLÓN	PAYSANDÚ	C. DEL UY.	CAMPI.	GUALE.	FRAY BENTOS	N. PALMIRA
ene 1980	31	31	31	31	0	31	31	93	0	0	0	0	743
feb 1980	29	29	29	29	0	29	29	87	0	0	0	0	696
mar 1980	31	31	31	31	0	31	31	93	0	0	0	0	63
abr 1980	30	30	30	30	0	30	30	90	0	0	0	0	60
may 1980	31	31	31	31	0	31	31	93	0	0	0	0	62
jun 1980	30	30	30	30	0	30	30	90	0	0	0	0	60
jul 1980	31	31	31	31	0	31	31	93	0	0	0	0	62
ago 1980	31	31	31	31	0	31	31	93	0	0	0	0	62
sep 1980	30	30	30	30	0	30	30	90	0	0	0	0	60
oct 1980	31	31	31	31	0	31	31	93	0	0	0	0	62
nov 1980	30	30	30	30	0	30	30	90	0	0	0	0	60
dic 1980	31	31	31	31	0	31	31	93	0	0	0	0	62
ene 1981	31	31	31	31	0	31	31	93	0	0	0	0	62
feb 1981	28	28	28	28	0	28	28	84	0	0	0	0	56
mar 1981	31	31	31	31	0	31	31	93	0	0	0	0	62
abr 1981	30	30	29	30	0	30	30	90	0	0	0	0	60
may 1981	31	31	31	31	0	31	31	93	0	0	0	0	62
jun 1981	30	30	30	30	0	30	30	90	0	0	0	0	60
jul 1981	31	31	31	31	0	31	31	93	0	0	0	0	62
ago 1981	31	31	31	31	0	31	31	93	0	0	0	0	62
sep 1981	30	30	30	30	0	30	30	90	0	0	0	0	60
oct 1981	31	31	31	31	0	31	31	93	0	0	0	0	62
nov 1981	30	30	30	30	0	30	30	90	0	0	0	0	60
dic 1981	31	31	31	31	0	31	31	93	0	0	0	0	62

FECHA	SALTO	CONC.	YERUÁ	N. ESCOCIA	LA CALERA	FCA. COLÓN	COLÓN	PAYSANDÚ	C. DEL UY.	CAMPI.	GUALE.	FRAY BENTOS	N. PALMIRA
ene 1982	31	31	31	31	0	31	31	93	0	0	0	0	62
feb 1982	28	28	28	28	0	28	28	84	0	0	0	0	56
mar 1982	31	31	31	31	0	31	31	93	0	0	0	0	62
abr 1982	30	30	30	30	0	30	30	90	0	0	0	0	60
may 1982	31	31	31	31	0	31	31	93	0	0	0	0	62
jun 1982	30	30	30	30	0	30	30	90	0	0	0	0	60
jul 1982	31	31	31	31	0	31	31	93	0	0	0	0	62
ago 1982	31	31	31	31	0	31	31	93	0	0	0	0	62
sep 1982	30	30	30	30	0	30	30	90	0	0	0	90	60
oct 1982	31	31	31	31	0	31	31	93	0	0	0	93	62
nov 1982	30	30	30	30	0	30	30	90	0	0	0	90	60
dic 1982	31	31	31	31	0	31	31	93	1	0	1	93	62
ene 1983	31	31	31	31	0	31	31	93	31	31	31	93	62
feb 1983	28	28	28	28	0	28	28	84	28	28	27	84	56
mar 1983	31	31	31	31	0	31	31	93	31	31	31	93	62
abr 1983	30	30	30	30	0	30	30	90	30	29	30	90	60
may 1983	31	31	31	31	0	31	31	93	31	31	31	93	62
jun 1983	30	30	30	30	0	30	30	90	30	30	30	90	60
jul 1983	31	31	31	31	0	31	31	93	31	31	23	93	62
ago 1983	31	31	31	31	0	31	31	93	31	31	31	93	62
sep 1983	30	30	30	30	0	30	30	90	30	30	30	88	60
oct 1983	31	31	31	31	0	31	31	93	31	31	31	93	62
nov 1983	30	30	30	30	0	30	30	90	30	29	30	90	60
dic 1983	31	31	31	31	0	31	31	93	31	31	31	93	62
ene 1984	31	31	31	18	0	31	31	93	31	31	31	93	743
feb 1984	29	29	29	29	0	29	29	85	29	29	29	87	696
mar 1984	31	31	31	31	0	31	31	93	31	31	31	93	1
abr 1984	30	30	30	30	0	30	30	90	30	27	30	90	0
may 1984	31	31	31	31	0	31	31	93	31	30	30	93	743
jun 1984	30	30	30	30	0	30	30	90	30	30	30	90	720
jul 1984	31	31	31	31	0	31	31	93	31	31	31	93	744
ago 1984	31	31	31	31	0	31	31	92	31	31	31	93	744
sep 1984	30	30	30	30	0	30	30	90	30	30	30	90	715
oct 1984	31	31	31	31	0	31	31	93	31	31	31	93	1
nov 1984	30	30	30	30	0	30	30	90	30	30	30	90	719
dic 1984	31	31	31	31	0	31	31	93	31	31	31	93	744
ene 1985	31	31	31	31	0	31	31	93	31	31	0	92	726
feb 1985	28	28	28	26	0	28	28	84	28	28	0	84	672
mar 1985	31	31	31	31	0	31	31	93	31	31	0	93	743
abr 1985	30	30	30	30	0	30	30	90	30	30	0	90	720
may 1985	31	31	31	30	0	31	31	93	31	31	0	93	547
jun 1985	30	30	30	29	0	30	30	90	30	29	0	90	175
jul 1985	31	31	31	31	0	31	31	93	30	31	0	93	744
ago 1985	31	31	31	31	0	31	31	93	31	31	0	93	1
sep 1985	30	30	30	30	0	30	30	90	30	30	0	90	0
oct 1985	31	31	31	31	0	31	31	93	31	31	0	93	0
nov 1985	30	30	30	30	0	30	30	90	30	30	0	90	719
dic 1985	31	31	31	0	0	31	31	93	31	31	0	93	1

FECHA	SALTO	CONC.	YERUÁ	N. ESCOCIA	LA CALERA	FCA. COLÓN	COLÓN	PAYSANDÚ	C. DEL UY.	CAMPI.	GUALE.	FRAY BENTOS	N. PALMIRA
ene 1986	31	31	31	0	0	31	31	93	31	31	31	93	62
feb 1986	28	28	28	28	0	28	28	84	28	28	27	84	56
mar 1986	31	31	30	31	0	31	31	93	31	31	31	93	62
abr 1986	30	30	30	30	0	30	30	90	30	30	0	30	60
may 1986	31	31	31	13	0	31	31	93	31	31	29	91	62
jun 1986	30	30	30	30	0	30	30	90	30	30	30	90	60
jul 1986	31	31	31	31	0	31	31	93	31	31	31	93	54
ago 1986	93	31	31	31	0	31	31	93	31	31	31	720	529
sep 1986	90	30	30	30	0	30	30	90	30	30	30	635	624
oct 1986	93	31	31	31	0	31	31	93	31	31	31	743	562
nov 1986	90	30	30	28	0	30	30	90	30	30	21	668	678
dic 1986	93	31	31	31	0	31	31	93	31	31	0	722	676
ene 1987	93	31	31	31	0	31	31	93	31	31	31	726	612
feb 1987	84	28	28	28	0	28	28	84	28	28	28	645	672
mar 1987	93	31	31	31	0	31	31	93	31	31	31	744	743
abr 1987	90	30	30	30	0	30	30	90	30	30	30	703	720
may 1987	93	31	31	31	0	31	31	93	31	31	31	744	744
jun 1987	90	30	30	30	0	30	30	90	30	30	30	685	720
jul 1987	93	31	31	31	0	31	31	93	31	31	31	703	744
ago 1987	93	31	31	31	0	31	31	93	31	31	31	722	744
sep 1987	90	30	30	30	0	30	30	90	30	30	30	697	720
oct 1987	93	31	31	31	0	31	31	93	31	31	31	726	744
nov 1987	90	30	30	30	0	30	30	90	30	30	30	699	720
dic 1987	93	31	31	31	0	31	31	93	31	31	31	737	744
ene 1988	93	31	31	31	0	31	31	93	31	31	31	706	637
feb 1988	87	29	29	29	0	29	29	87	29	29	29	676	695
mar 1988	93	31	31	31	0	31	31	93	31	31	31	613	744
abr 1988	90	30	30	30	0	30	30	90	30	30	30	571	720
may 1988	123	31	31	31	0	31	31	93	31	31	31	736	744
jun 1988	121	30	30	30	0	30	30	90	30	30	30	671	719
jul 1988	123	31	31	31	0	31	31	93	31	31	31	727	744
ago 1988	124	31	31	31	0	24	31	123	31	31	31	744	744
sep 1988	120	30	30	30	0	16	30	119	30	30	30	168	645
oct 1988	124	31	31	31	0	31	31	124	31	31	31	639	725
nov 1988	120	30	30	16	0	30	30	91	30	30	30	720	720
dic 1988	124	31	31	31	0	31	31	115	31	31	31	731	723
ene 1989	124	31	31	31	0	31	31	112	31	31	31	707	744
feb 1989	112	28	28	28	0	28	28	112	28	28	28	659	643
mar 1989	124	31	31	31	0	31	31	124	31	30	31	726	511
abr 1989	120	30	30	30	0	30	30	120	30	30	30	720	654
may 1989	124	31	31	31	0	31	31	124	31	31	31	744	370
jun 1989	120	30	30	30	0	30	30	117	30	30	30	678	719
jul 1989	124	30	31	30	0	31	31	124	31	31	31	241	741
ago 1989	124	31	31	31	0	31	31	124	31	30	31	541	665
sep 1989	120	30	30	30	0	30	30	120	30	30	30	0	719
oct 1989	124	31	31	31	0	31	31	124	31	31	31	0	719
nov 1989	120	30	30	27	0	30	30	120	30	30	30	0	708
dic 1989	124	31	31	31	0	31	31	124	31	31	31	236	744

FECHA	SALTO	CONC.	YERUÁ	N. ESCOCIA	LA CALERA	FCA. COLÓN	COLÓN	PAYSANDÚ	C. DEL UY.	CAMPI.	GUALE.	FRAY BENTOS	N. PALMIRA
ene 1990	124	31	31	31	0	31	31	94	31	31	31	744	695
feb 1990	112	28	28	28	0	28	28	83	28	28	28	657	672
mar 1990	124	31	31	31	0	31	31	93	31	31	31	674	718
abr 1990	120	30	30	30	0	30	30	90	30	30	30	720	712
may 1990	124	31	31	31	0	31	31	93	31	31	31	712	744
jun 1990	120	30	30	30	0	30	30	90	30	17	30	658	720
jul 1990	124	31	31	31	0	31	31	93	31	31	31	729	551
ago 1990	124	31	31	31	0	31	31	93	31	31	31	744	537
sep 1990	120	30	30	29	0	30	30	90	30	30	30	673	700
oct 1990	124	31	31	31	0	31	31	93	31	31	31	614	693
nov 1990	120	30	30	30	0	30	30	90	30	30	30	720	551
dic 1990	124	31	31	31	0	31	31	93	31	31	31	728	730
ene 1991	94	31	31	31	0	31	31	123	0	0	0	744	622
feb 1991	84	28	28	28	0	28	28	112	0	0	0	672	604
mar 1991	93	31	31	31	0	31	31	124	0	0	0	737	744
abr 1991	90	30	30	30	0	30	30	120	0	0	0	551	720
may 1991	93	31	31	31	0	31	31	124	0	0	0	641	744
jun 1991	90	30	30	0	0	30	30	120	0	0	0	719	720
jul 1991	123	31	31	31	0	31	31	124	0	0	0	744	744
ago 1991	124	31	31	31	0	31	31	124	0	0	0	744	744
sep 1991	120	30	30	30	0	30	30	120	0	0	0	641	314
oct 1991	124	31	31	0	0	31	31	124	0	0	0	740	705
nov 1991	120	30	30	0	0	30	30	120	0	0	0	720	720
dic 1991	124	31	31	0	0	31	31	124	0	0	0	743	717
ene 1992	124	31	31	0	0	31	31	744	0	0	0	94	720
feb 1992	116	29	29	29	0	29	29	696	0	0	0	87	695
mar 1992	124	31	31	31	0	31	31	743	0	0	0	93	744
abr 1992	91	30	30	30	0	30	30	499	0	0	0	90	720
may 1992	123	31	31	31	0	31	31	666	0	0	0	93	744
jun 1992	120	30	30	30	0	30	30	714	0	0	0	90	720
jul 1992	124	31	31	31	0	31	31	598	0	0	0	93	744
ago 1992	124	31	31	31	0	31	31	742	0	0	0	93	744
sep 1992	120	30	30	30	0	30	30	661	0	0	0	90	720
oct 1992	124	31	31	0	0	31	31	743	0	0	0	93	744
nov 1992	91	30	30	0	0	30	30	719	0	0	0	90	720
dic 1992	93	31	31	0	0	31	31	743	1	1	1	93	741
ene 1993	93	31	30	0	0	31	31	115	31	31	31	93	742
feb 1993	84	28	28	0	0	28	28	89	28	28	26	84	672
mar 1993	93	31	31	0	0	31	31	124	31	31	31	93	32
abr 1993	119	30	30	30	0	30	30	123	30	30	30	90	717
may 1993	185	31	31	31	0	31	31	126	31	29	31	93	744
jun 1993	120	30	30	30	0	30	30	120	30	30	30	90	720
jul 1993	125	31	31	31	0	31	31	124	31	31	31	93	744
ago 1993	93	31	31	0	0	31	31	123	31	31	31	93	709
sep 1993	119	30	30	30	0	30	30	120	30	30	29	90	424
oct 1993	94	31	31	31	0	31	31	123	31	31	31	93	744
nov 1993	90	30	30	30	0	30	30	90	30	30	30	90	720
dic 1993	92	31	31	31	0	31	31	123	31	31	31	93	744

FECHA	SALTO	CONC.	YERUÁ	N. ESCOCIA	LA CALERA	FCA. COLÓN	COLÓN	PAYSANDÚ	C. DEL UY.	CAMPI.	GUALE.	FRAY BENTOS	N. PALMIRA
ene 1994	123	31	31	31	0	31	31	123	31	30	31	736	744
feb 1994	112	28	28	28	0	28	28	110	28	28	28	672	672
mar 1994	124	31	31	31	0	31	31	124	31	31	31	744	744
abr 1994	120	30	30	30	0	30	30	120	30	30	30	720	720
may 1994	124	31	31	31	0	31	31	124	31	31	31	744	744
jun 1994	120	30	30	30	0	30	30	120	30	30	30	688	720
jul 1994	124	31	31	31	0	31	31	124	31	31	31	744	744
ago 1994	124	31	31	31	0	31	31	124	31	31	31	720	743
sep 1994	120	30	30	30	0	30	30	120	30	30	30	695	720
oct 1994	94	31	31	31	0	31	31	124	31	31	31	737	744
nov 1994	119	30	0	30	0	30	30	118	30	30	30	713	720
dic 1994	124	31	0	31	0	31	31	119	31	31	31	744	744
ene 1995	124	31	31	31	0	31	31	737	31	31	31	32	744
feb 1995	85	28	28	28	0	28	28	671	28	28	28	28	672
mar 1995	123	31	31	31	31	31	31	743	31	31	31	31	744
abr 1995	120	30	30	0	30	30	30	694	30	30	30	30	663
may 1995	124	31	31	31	31	31	31	742	31	31	31	31	744
jun 1995	120	30	30	0	30	30	30	720	30	30	30	26	720
jul 1995	124	31	31	31	31	31	31	692	31	31	31	25	744
ago 1995	124	31	31	31	31	31	31	732	31	31	31	29	744
sep 1995	120	30	30	30	30	30	30	713	30	30	30	30	720
oct 1995	124	31	31	31	31	31	30	94	31	31	31	31	1
nov 1995	120	30	30	30	30	30	30	90	30	30	30	29	0
dic 1995	124	31	31	31	31	31	31	741	31	31	31	31	0
ene 1996	124	31	31	31	31	31	31	744	31	31	31	736	735
feb 1996	116	29	29	29	29	29	29	696	28	29	29	684	696
mar 1996	124	31	31	31	31	31	31	743	31	31	31	1	744
abr 1996	120	30	30	30	30	30	30	720	30	30	30	688	34
may 1996	124	31	31	31	31	31	31	740	31	31	31	744	0
jun 1996	120	30	30	30	30	30	30	718	30	30	30	720	0
jul 1996	94	31	31	31	31	31	31	742	31	31	31	743	0
ago 1996	93	31	31	31	31	31	31	743	31	31	31	741	0
sep 1996	90	30	30	30	30	30	30	720	30	30	30	718	7
oct 1996	93	31	31	31	31	31	31	744	31	31	31	721	744
nov 1996	90	30	30	30	30	30	30	718	30	30	30	720	720
dic 1996	93	31	31	31	31	31	31	739	31	31	31	744	744
ene 1997	123	31	31	31	31	31	31	744	31	31	31	711	743
feb 1997	85	28	28	28	28	28	28	672	28	28	28	643	672
mar 1997	123	31	31	31	31	31	31	744	31	31	31	713	744
abr 1997	120	30	30	30	30	30	30	720	30	30	30	719	720
may 1997	124	31	31	31	31	31	31	744	31	31	31	743	744
jun 1997	120	30	30	30	30	30	30	720	30	30	30	719	719
jul 1997	124	31	31	31	31	31	31	744	31	31	31	742	744
ago 1997	94	31	31	31	31	31	31	744	31	31	31	739	732
sep 1997	90	30	30	30	30	30	30	720	30	30	30	719	719
oct 1997	123	31	31	31	31	16	31	744	31	18	31	735	693
nov 1997	120	30	30	30	28	0	30	719	30	0	30	717	710
dic 1997	124	31	31	31	31	19	31	744	31	31	31	744	658

FECHA	SALTO	CONC.	YERUÁ	N. ESCOCIA	LA CALERA	FCA. COLÓN	COLÓN	PAYSANDÚ	C. DEL UY.	CAMPI.	GUALE.	FRAY BENTOS	N. PALMIRA
ene 1998	124	31	31	31	31	18	31	744	31	31	29	662	744
feb 1998	112	28	28	28	28	0	28	672	28	28	28	672	669
mar 1998	124	31	31	31	31	24	31	743	31	31	31	743	744
abr 1998	123	30	30	30	30	17	30	720	30	30	30	658	576
may 1998	124	31	31	29	31	19	31	743	31	31	31	634	744
jun 1998	120	30	30	30	30	30	30	720	30	30	30	716	582
jul 1998	124	31	31	31	31	31	31	744	31	31	31	743	744
ago 1998	124	31	31	31	31	31	31	743	31	31	31	743	744
sep 1998	91	30	30	30	30	30	30	719	30	30	30	720	677
oct 1998	123	31	31	31	31	31	31	736	31	31	30	744	744
nov 1998	120	30	30	30	30	30	30	720	30	30	30	720	720
dic 1998	124	31	31	31	31	31	31	744	31	31	31	744	744
ene 1999	94	31	31	31	31	31	31	744	31	31	31	738	744
feb 1999	111	28	28	28	28	28	28	671	28	28	28	670	672
mar 1999	124	31	31	31	31	31	31	744	31	31	31	744	690
abr 1999	120	30	30	30	30	30	30	720	30	30	30	720	697
may 1999	94	31	31	31	31	31	31	744	31	31	31	743	743
jun 1999	90	30	30	30	30	30	30	720	30	30	30	712	719
jul 1999	123	31	31	31	31	31	31	744	31	31	31	744	744
ago 1999	124	31	31	31	31	31	31	744	31	31	31	502	615
sep 1999	90	30	30	30	30	30	30	1	30	30	30	403	680
oct 1999	93	31	31	31	31	31	31	743	31	31	31	366	744
nov 1999	90	30	30	30	15	22	30	720	30	30	30	526	720
dic 1999	93	31	31	31	0	0	31	744	31	31	31	571	744
ene 2000	93	31	12	31	0	0	31	1	31	31	31	583	744
feb 2000	87	29	15	29	0	0	29	0	29	29	29	527	696
mar 2000	93	31	22	0	0	0	31	0	31	31	31	550	744
abr 2000	90	30	27	0	0	28	30	0	30	30	30	414	720
may 2000	93	31	29	0	0	29	26	0	31	30	31	419	744
jun 2000	118	30	27	30	0	27	30	0	30	9	30	373	720
jul 2000	124	31	30	31	0	30	31	0	31	0	31	315	744
ago 2000	124	31	15	31	0	16	31	743	31	15	31	448	744
sep 2000	120	30	28	30	0	23	30	720	30	30	30	371	518
oct 2000	124	31	31	31	0	31	31	744	31	31	31	317	0
nov 2000	120	30	30	30	0	29	30	720	30	30	30	406	0
dic 2000	124	31	31	31	0	29	31	744	31	31	31	558	0
ene 2001	120	31	30	31	31	31	31	519	31	31	31	392	0
feb 2001	111	28	28	28	28	28	28	670	28	28	28	346	0
mar 2001	93	31	31	31	31	31	31	744	31	31	31	464	0
abr 2001	90	30	30	30	30	30	30	719	30	30	30	394	0
may 2001	93	31	31	31	31	31	28	398	31	28	31	231	0
jun 2001	90	30	30	30	30	30	30	719	30	29	30	304	0
jul 2001	93	31	31	31	31	31	31	744	31	28	31	375	0
ago 2001	93	31	31	31	31	31	31	744	31	30	31	443	0
sep 2001	90	30	30	30	30	30	30	720	30	30	30	401	0
oct 2001	93	31	31	31	31	31	31	744	31	31	31	267	0
nov 2001	90	30	30	30	30	28	30	720	30	30	30	434	0
dic 2001	93	31	31	31	31	0	31	744	31	31	31	546	0

FECHA	SALTO	CONC.	YERUÁ	N. ESCOCIA	LA CALERA	FCA. COLÓN	COLÓN	PAYSANDÚ	C. DEL UY.	CAMPI.	GUALE.	FRAY BENTOS	N. PALMIRA
ene 2002	93	31	19	31	31	0	31	744	31	31	31	579	0
feb 2002	84	28	28	28	28	17	28	672	28	28	28	519	0
mar 2002	93	31	31	31	31	31	31	743	31	31	31	549	0
abr 2002	90	30	30	30	30	30	30	720	30	30	30	305	0
may 2002	346	31	30	31	31	31	31	744	31	30	31	174	350
jun 2002	159	30	29	30	29	30	30	697	30	30	30	30	720
jul 2002	319	31	31	31	31	31	31	743	31	31	31	55	744
ago 2002	732	31	31	31	31	31	31	744	31	31	31	259	744
sep 2002	720	30	30	30	30	30	30	720	30	28	30	282	720
oct 2002	744	31	31	31	31	22	31	744	31	31	31	409	744
nov 2002	720	30	30	30	20	30	30	720	30	30	30	262	720
dic 2002	331	31	31	31	0	26	31	744	31	28	31	358	744
ene 2003	458	31	31	31	0	31	0	687	31	31	31	403	744
feb 2003	503	28	28	28	0	28	0	456	28	28	28	324	672
mar 2003	245	31	31	31	0	31	0	744	31	31	31	149	744
abr 2003	90	30	30	29	0	30	0	720	30	30	30	382	720
may 2003	93	31	31	31	0	31	0	743	31	31	31	187	744
jun 2003	74	30	30	30	0	30	0	720	30	30	30	331	720
jul 2003	0	31	31	31	0	31	0	744	31	30	31	406	744
ago 2003	0	31	31	31	0	31	0	744	31	31	30	464	744
sep 2003	0	30	30	30	0	30	0	720	30	28	30	485	720
oct 2003	0	31	31	31	0	31	0	744	31	26	31	519	744
nov 2003	335	30	29	30	0	30	0	697	30	30	30	453	720
dic 2003	287	31	31	0	0	31	0	743	31	31	31	374	744
ene 2004	517	31	31	31	0	31	29	743	31	31	31	453	744
feb 2004	539	29	29	29	20	29	29	695	29	27	29	482	696
mar 2004	558	31	31	31	31	31	31	744	31	31	31	560	744
abr 2004	370	30	28	29	30	30	30	718	30	30	30	545	720
may 2004	744	31	31	31	31	31	31	743	31	31	31	542	744
jun 2004	720	30	30	30	30	30	30	720	30	30	30	457	720
jul 2004	691	31	31	0	31	31	31	1	31	31	31	209	744
ago 2004	545	31	31	31	31	31	31	0	31	31	31	544	744
sep 2004	536	30	30	30	30	30	30	0	30	30	30	550	720
oct 2004	701	31	31	31	31	31	31	0	31	31	31	489	744
nov 2004	720	30	30	30	30	30	30	0	30	30	30	411	720
dic 2004	744	31	31	31	31	31	31	0	31	31	31	627	744
ene 2005	744	31	31	31	31	31	31	0	31	31	31	744	744
feb 2005	672	28	28	28	28	28	28	0	28	28	28	672	672
mar 2005	707	31	31	31	31	31	31	0	31	31	31	744	744
abr 2005	0	30	30	30	30	30	30	0	30	30	30	720	720
may 2005	0	31	31	31	31	31	31	0	31	31	31	744	744
jun 2005	371	30	30	30	30	30	30	0	30	30	30	720	720
jul 2005	744	31	31	31	31	31	31	0	31	31	31	744	744
ago 2005	744	31	31	31	31	31	31	663	31	31	31	744	744
sep 2005	720	30	30	30	30	30	30	719	30	30	30	720	720
oct 2005	744	31	31	31	31	31	31	744	31	31	31	744	744
nov 2005	720	30	30	30	30	30	30	275	30	30	30	720	720
dic 2005	744	31	31	31	31	31	31	460	31	31	31	744	744

FECHA	SALTO	CONC.	YERUÁ	N. ESCOCIA	LA CALERA	FCA. COLÓN	COLÓN	PAYSANDÚ	C. DEL UY.	CAMPI.	GUALE.	FRAY BENTOS	N. PALMIRA
ene 2006	744	31	31	31	31	31	31	744	31	31	31	744	744
feb 2006	672	28	28	28	28	28	28	563	28	28	28	648	672
mar 2006	744	31	31	31	31	31	31	665	31	31	31	744	744
abr 2006	720	30	30	30	30	30	30	720	30	30	30	720	720
may 2006	744	31	31	31	31	31	31	730	31	31	31	744	744
jun 2006	720	30	30	30	30	30	30	720	30	30	30	720	720
jul 2006	744	31	31	31	31	31	31	744	31	31	31	720	744
ago 2006	744	31	31	31	31	31	31	744	31	31	31	744	562
sep 2006	720	30	30	30	30	30	30	720	30	30	30	720	420
oct 2006	744	31	31	31	31	31	31	744	31	31	31	744	454
nov 2006	720	30	30	30	30	30	30	720	30	30	30	720	412
dic 2006	744	31	31	31	31	31	31	744	31	31	31	744	440
ene 2007	744	31	31	31	31	31	31	744	31	31	31	744	474
feb 2007	672	28	28	28	28	28	28	672	28	28	28	672	398
mar 2007	744	31	31	31	31	31	31	744	31	31	31	744	344
abr 2007	720	29	30	30	30	30	30	720	30	30	30	720	296
may 2007	744	30	31	31	31	31	31	744	31	31	31	744	293
jun 2007	719	30	30	0	30	30	30	720	30	30	30	720	283
jul 2007	744	31	31	31	31	31	31	744	31	31	31	744	367
ago 2007	744	31	31	31	31	31	31	744	31	31	31	744	350
sep 2007	613	30	30	30	30	30	30	720	30	30	30	719	392
oct 2007	0	31	31	31	31	31	31	744	31	31	31	744	365
nov 2007	0	30	30	30	30	30	30	720	30	29	30	720	414
dic 2007	470	31	31	31	31	31	30	744	31	30	31	744	453
ene 2008	744	31	31	31	31	31	31	744	31	31	31	744	440
feb 2008	696	29	29	29	29	29	29	696	29	29	29	696	438
mar 2008	744	31	31	31	31	31	31	744	31	31	31	744	457
abr 2008	720	30	30	30	30	30	30	719	30	28	30	720	434
may 2008	744	31	31	31	31	31	31	744	31	31	31	744	452
jun 2008	719	30	30	30	30	30	30	720	30	30	30	720	395
jul 2008	744	31	31	31	31	31	31	744	31	31	31	744	428
ago 2008	744	31	31	31	31	31	30	744	31	31	31	720	397
sep 2008	720	30	30	30	30	30	30	720	30	30	30	720	393
oct 2008	744	31	31	31	31	31	31	744	31	31	31	744	405
nov 2008	720	30	30	30	30	30	30	720	30	30	30	720	348
dic 2008	744	31	31	31	31	31	31	744	31	31	31	720	444
ene 2009	744	31	31	31	31	31	31	744	31	31	31	744	504
feb 2009	672	28	28	28	28	28	28	672	28	28	28	672	438
mar 2009	744	31	31	31	31	31	31	744	31	29	31	744	464
abr 2009	720	30	30	30	30	30	30	720	30	30	30	720	464
may 2009	744	31	31	31	31	31	31	744	31	31	31	744	518
jun 2009	720	30	30	30	30	30	30	720	30	30	30	720	474
jul 2009	744	31	31	31	31	31	31	744	31	31	31	744	442
ago 2009	720	31	31	31	31	31	31	744	31	31	31	744	340
sep 2009	720	30	30	30	30	30	30	719	30	30	30	720	335
oct 2009	1	31	30	31	30	31	31	744	31	31	31	744	343
nov 2009	0	30	30	30	30	25	30	720	30	30	30	720	323
dic 2009	0	31	22	24	31	23	31	744	31	31	31	744	230

FECHA	SALTO	CONC.	YERUÁ	N. ESCOCIA	LA CALERA	FCA. COLÓN	COLÓN	PAYSANDÚ	C. DEL UY.	CAMPI.	GUALE.	FRAY BENTOS	N. PALMIRA
ene 2010	0	31	27	31	31	31	31	744	31	31	31	744	331
feb 2010	0	28	27	28	28	28	28	672	28	28	28	672	246
mar 2010	491	31	24	31	31	31	31	744	31	31	31	744	306
abr 2010	720	30	30	30	30	30	30	720	30	30	30	719	327
may 2010	744	31	31	30	31	31	31	744	31	31	31	744	313
jun 2010	720	30	30	30	30	30	30	720	30	30	30	373	298
jul 2010	743	31	31	31	31	31	31	744	31	31	31	0	340
ago 2010	744	31	31	31	31	31	31	744	31	31	31	0	491
sep 2010	337	30	30	30	30	30	30	720	30	30	30	227	720
oct 2010	0	31	31	31	31	31	31	744	31	30	31	744	744
nov 2010	0	30	30	30	30	30	30	720	30	30	30	720	709
dic 2010	0	31	31	31	31	31	31	768	31	31	31	721	436
ene 2011	0	31	31	31	31	31	31	1488	31	31	31	0	0
feb 2011	0	28	28	28	28	28	28	1344	28	28	28	0	0
mar 2011	0	31	31	31	31	31	31	1488	31	31	31	0	0
abr 2011	0	30	30	30	30	30	30	1440	30	30	30	0	0
may 2011	0	31	31	31	31	31	31	1488	31	31	31	0	0
jun 2011	0	30	30	30	30	30	30	1439	30	30	30	0	0
jul 2011	0	31	31	31	31	31	31	1488	31	31	31	0	0
ago 2011	0	31	31	31	31	31	31	1488	31	31	31	0	0
sep 2011	0	30	30	30	30	30	30	1440	30	30	30	0	0
oct 2011	0	31	31	31	31	31	31	1488	31	31	31	0	0
nov 2011	0	30	30	30	30	30	30	1439	30	29	30	0	0
dic 2011	0	31	31	31	31	31	31	1488	31	31	31	0	0
ene 2012	0	31	31	31	31	31	31	1488	0	0	0	0	0
feb 2012	0	29	29	29	29	29	29	1392	0	0	0	0	0
mar 2012	0	31	31	31	31	31	31	1488	0	0	0	0	0
abr 2012	0	30	30	30	30	30	30	1440	0	0	0	0	0
may 2012	0	31	31	31	31	31	31	1488	0	0	0	0	0
jun 2012	0	30	30	0	30	30	30	1440	0	0	0	0	0
jul 2012	0	31	31	31	31	31	31	1488	0	0	0	0	0
ago 2012	0	31	31	31	31	31	31	1488	0	0	0	0	0
sep 2012	0	30	30	30	30	30	30	1440	0	0	0	0	0
oct 2012	0	31	31	31	31	31	31	1488	0	0	0	0	0
nov 2012	0	47	30	30	30	30	47	1440	17	0	0	0	0
dic 2012	0	741	31	31	31	31	739	1488	720	0	0	0	0
ene 2013	0	741	31	1	31	1	738	1432	736	0	0	0	0
feb 2013	0	671	28	0	28	0	671	722	671	0	0	0	0
mar 2013	0	740	31	0	31	0	744	545	740	0	0	0	0
abr 2013	0	719	30	0	30	0	720	417	710	0	0	0	0
may 2013	0	742	31	0	31	0	742	712	736	0	0	0	0
jun 2013	0	718	30	0	30	0	719	668	719	0	0	0	0
jul 2013	0	744	31	0	31	0	742	594	742	0	0	0	0
ago 2013	0	742	31	0	31	0	740	692	741	0	0	0	0
sep 2013	0	720	30	0	30	0	720	649	716	0	0	0	0
oct 2013	0	743	31	0	31	0	743	613	742	0	0	0	0
nov 2013	0	719	30	0	30	0	719	377	719	0	0	0	0
dic 2013	0	743	31	0	31	0	744	622	695	0	0	0	0

FECHA	SALTO	CONC.	YERUÁ	N. ESCOCIA	LA CALERA	FCA. COLÓN	COLÓN	PAYSANDÚ	C. DEL UY.	CAMPI.	GUALE.	FRAY BENTOS	N. PALMIRA
ene 2014	0	720	0	0	0	0	720	763	0	0	0	0	0
feb 2014	0	624	0	0	0	0	624	652	158	0	0	0	0
mar 2014	0	743	0	0	0	0	740	651	730	0	0	0	0
abr 2014	0	696	0	0	0	0	695	511	685	0	0	0	0
may 2014	0	741	0	0	0	0	742	593	740	0	0	0	0
jun 2014	0	718	0	0	0	0	720	283	712	0	0	0	0
jul 2014	0	719	0	0	0	0	720	1	718	0	0	0	0
ago 2014	0	744	0	0	0	0	744	0	743	0	0	0	0
sep 2014	0	720	0	0	0	0	720	0	696	0	0	0	0
oct 2014	0	719	0	0	0	0	715	0	717	0	0	0	0
nov 2014	0	720	0	0	0	0	719	0	709	0	0	0	0
dic 2014	0	741	0	0	0	0	696	0	677	0	0	0	0
ene 2015	0	744	0	0	0	0	744	0	741	0	0	0	0
feb 2015	0	669	0	0	0	0	672	0	649	0	0	0	0
mar 2015	0	744	0	0	0	0	741	0	720	0	0	0	0
abr 2015	0	570	0	0	0	0	566	0	558	0	0	0	0
may 2015	0	384	0	0	0	0	384	0	381	0	0	0	0
jun 2015	0	575	0	0	0	0	597	0	570	0	0	0	0
jul 2015	0	734	0	0	0	0	743	0	728	0	0	0	0
ago 2015	0	718	0	0	0	0	718	0	717	0	0	0	0
sep 2015	0	720	0	0	0	0	720	0	718	0	0	0	0
oct 2015	0	127	0	0	0	0	127	0	127	0	0	0	0

1.3.2. Gráficos de densidad de datos diarios

Estos gráficos permiten visualizar la densidad de datos registrada en un día dado para la estación correspondiente. De este modo se puede tener una idea rápida de cómo varía la frecuencia de registro de niveles a lo largo del tiempo. El gráfico rojo representa la densidad de datos efectivamente medidos en el día, esto es, que tienen un valor, mientras que el gráfico azul representa la densidad de registros en un día, tengan o no un valor (se cuentan los registros donde el dato aparece como vacío o fue removido de la serie original al depurarla).

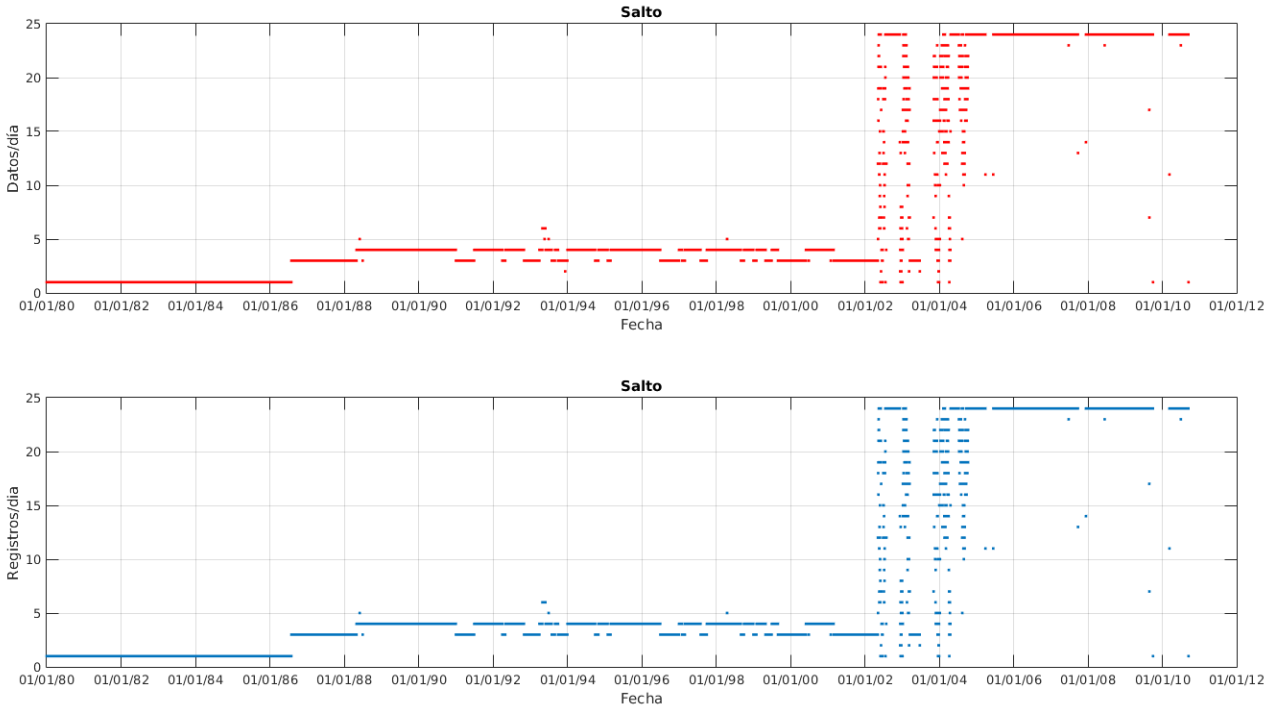


Figura 1.2: Densidad de datos diarios - Salto.

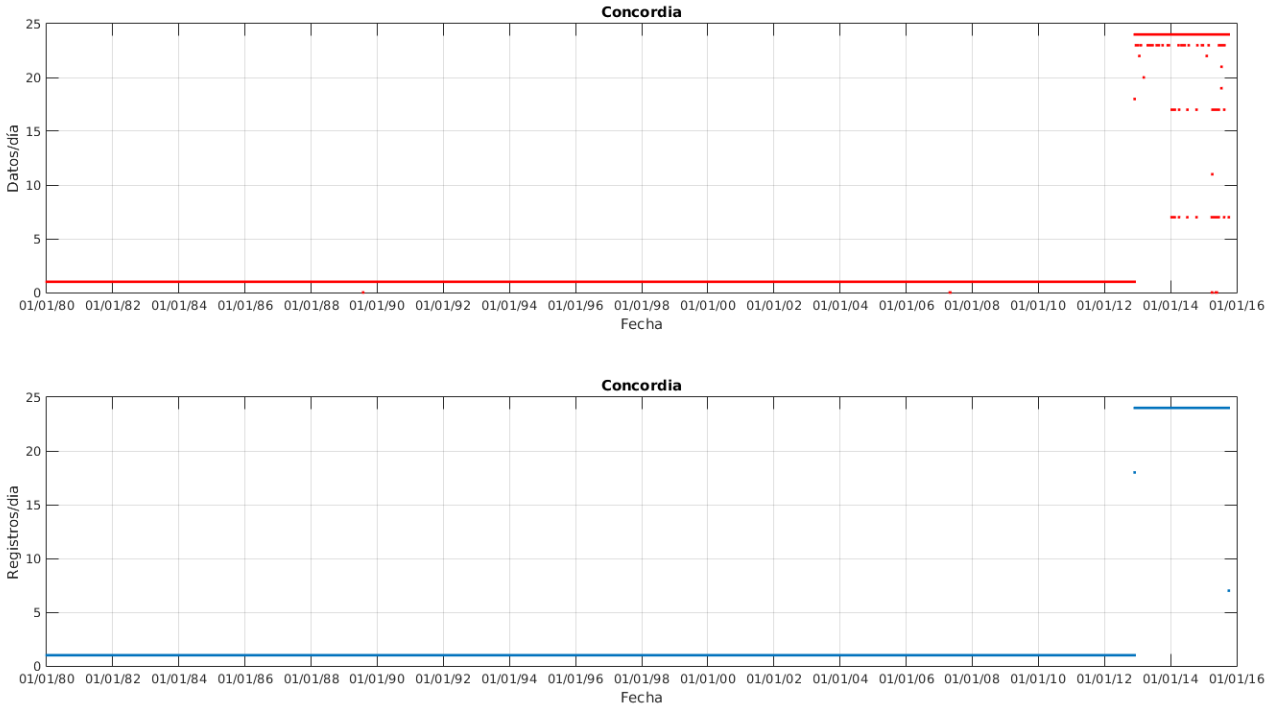


Figura 1.3: Densidad de datos diarios - Concordia.

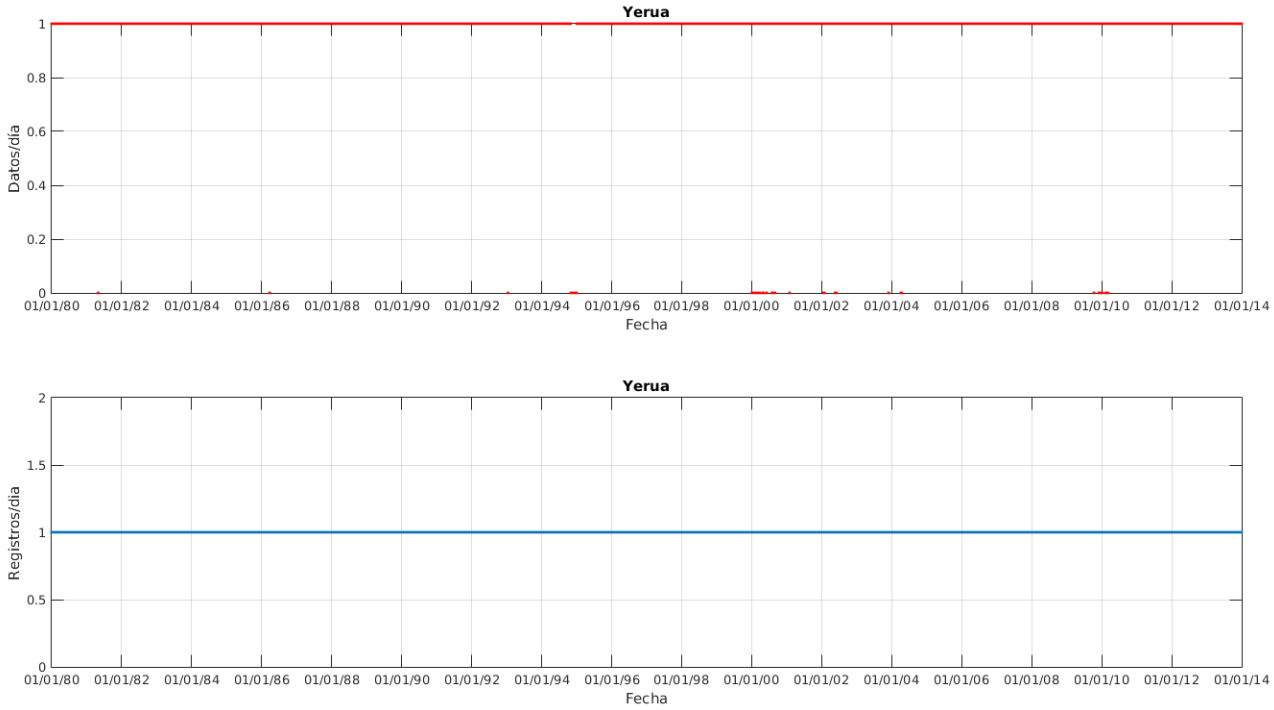


Figura 1.4: Densidad de datos diarios - Yeruá.

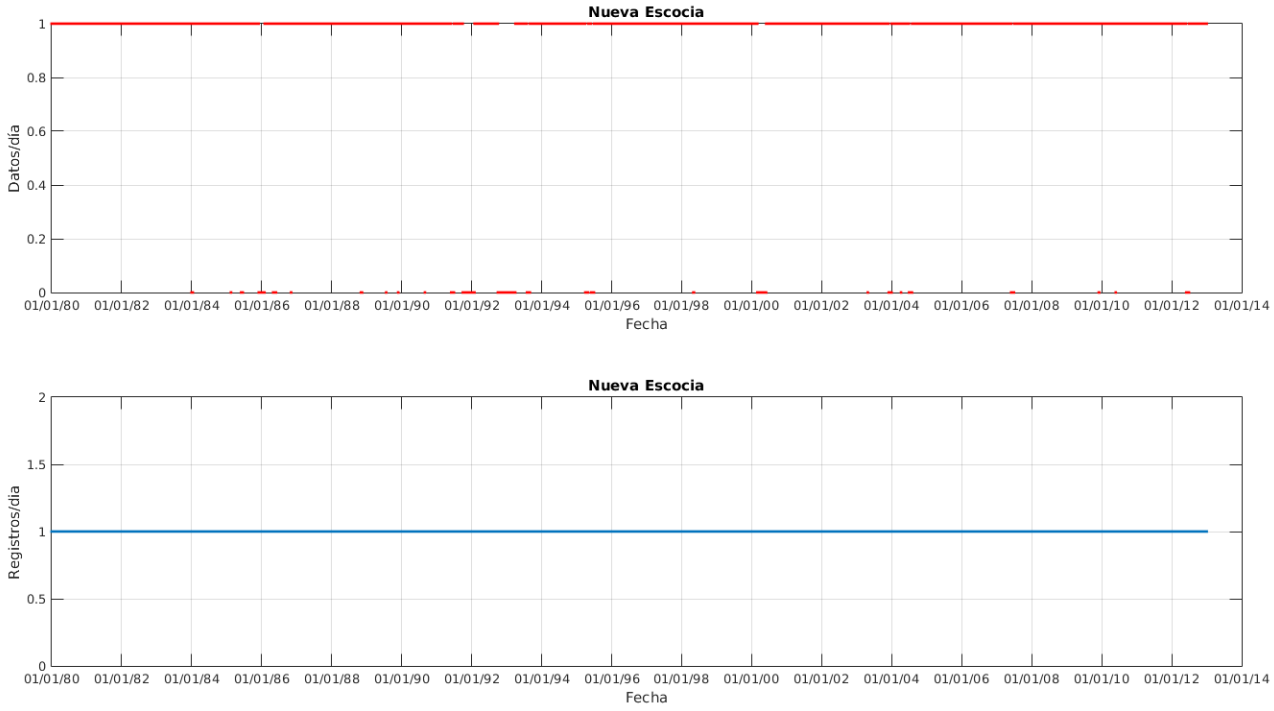


Figura 1.5: Densidad de datos diarios - Nueva Escocia.

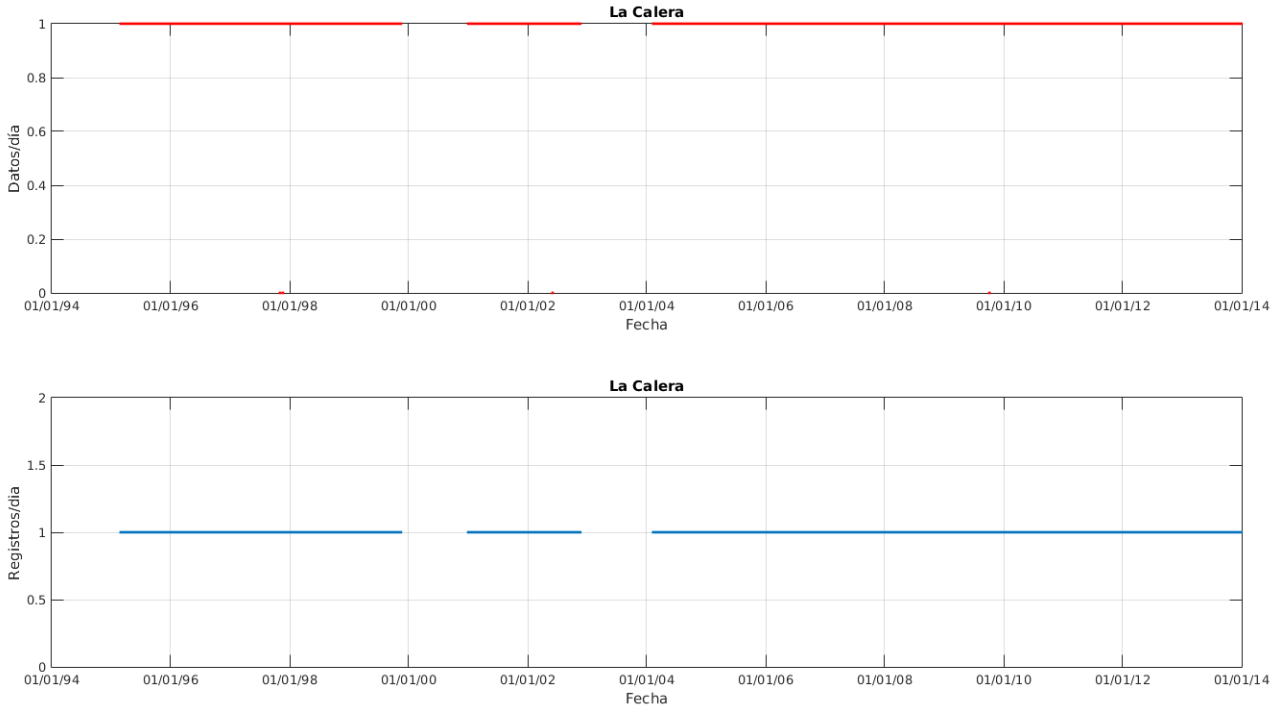


Figura 1.6: Densidad de datos diarios - La Calera.

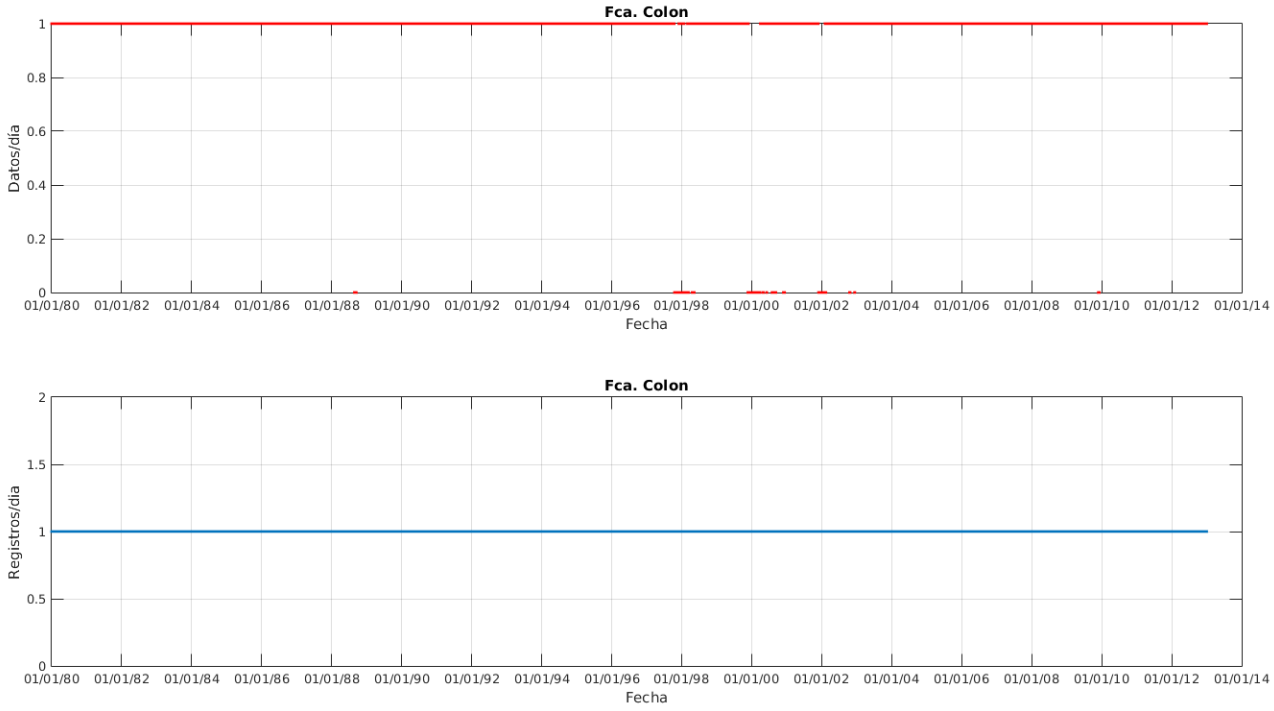


Figura 1.7: Densidad de datos diarios - Fábrica Colón.

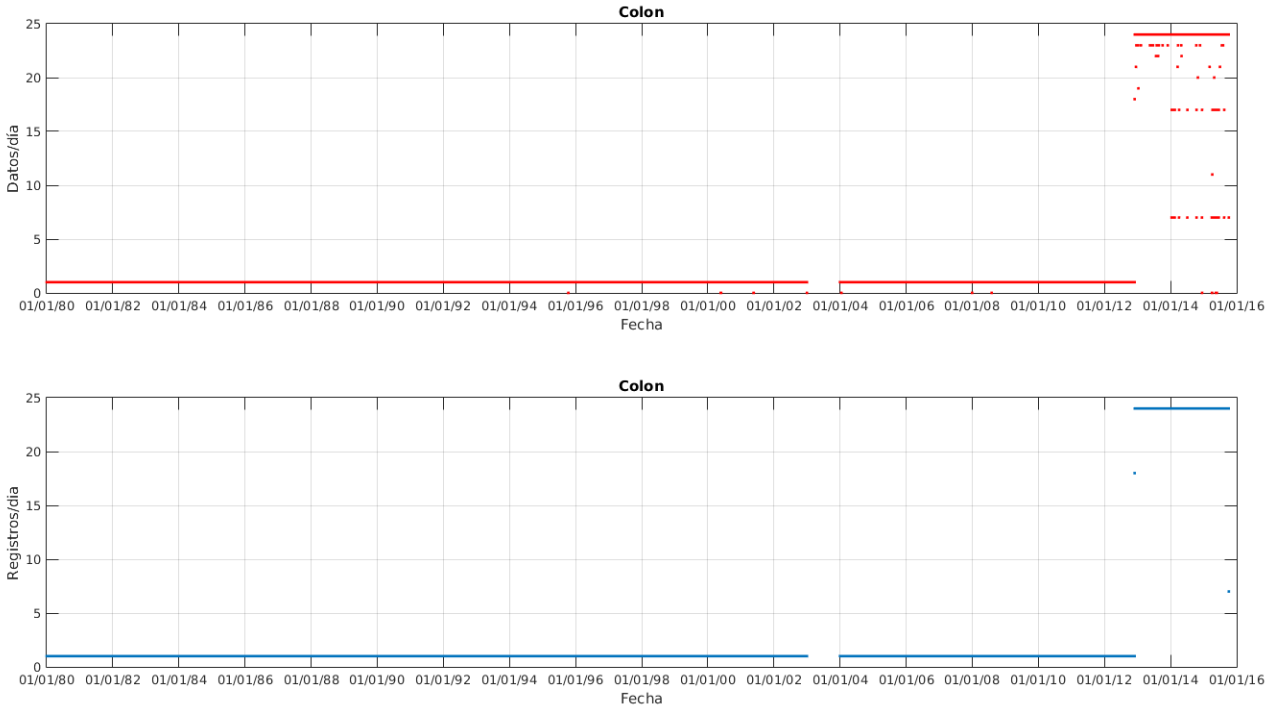


Figura 1.8: Densidad de datos diarios - Colón.

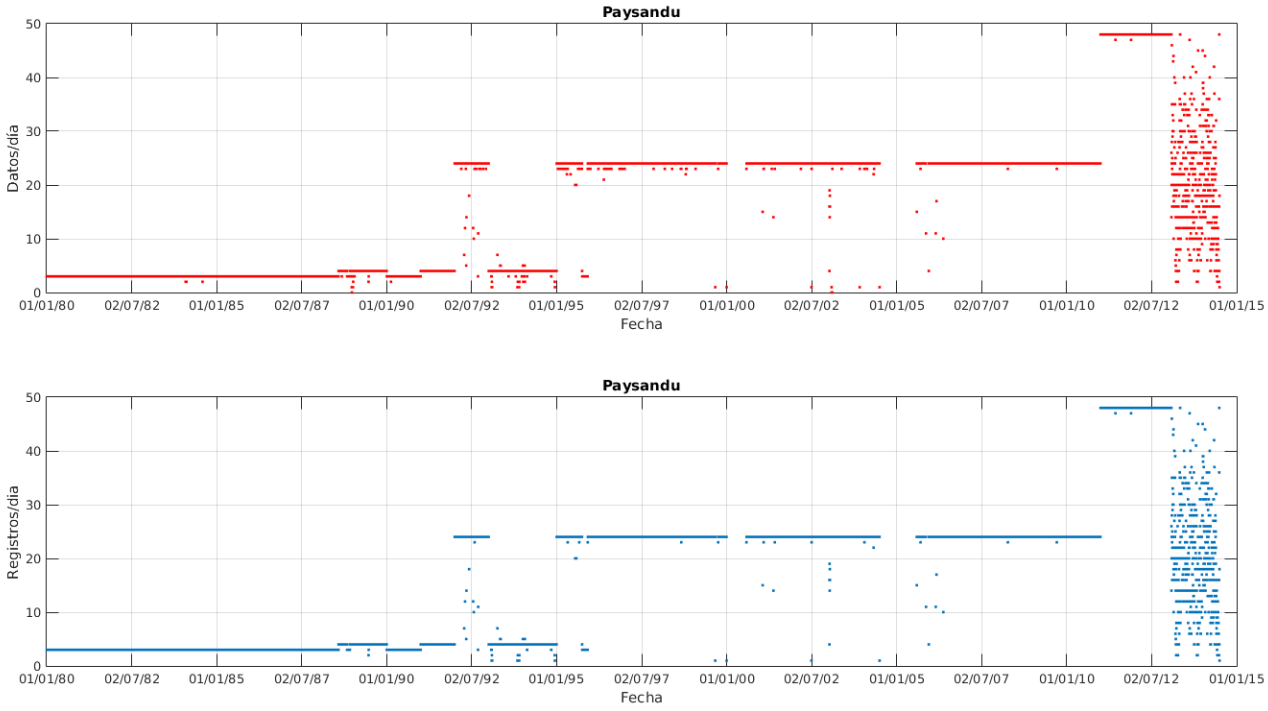


Figura 1.9: Densidad de datos diarios - Paysandú.

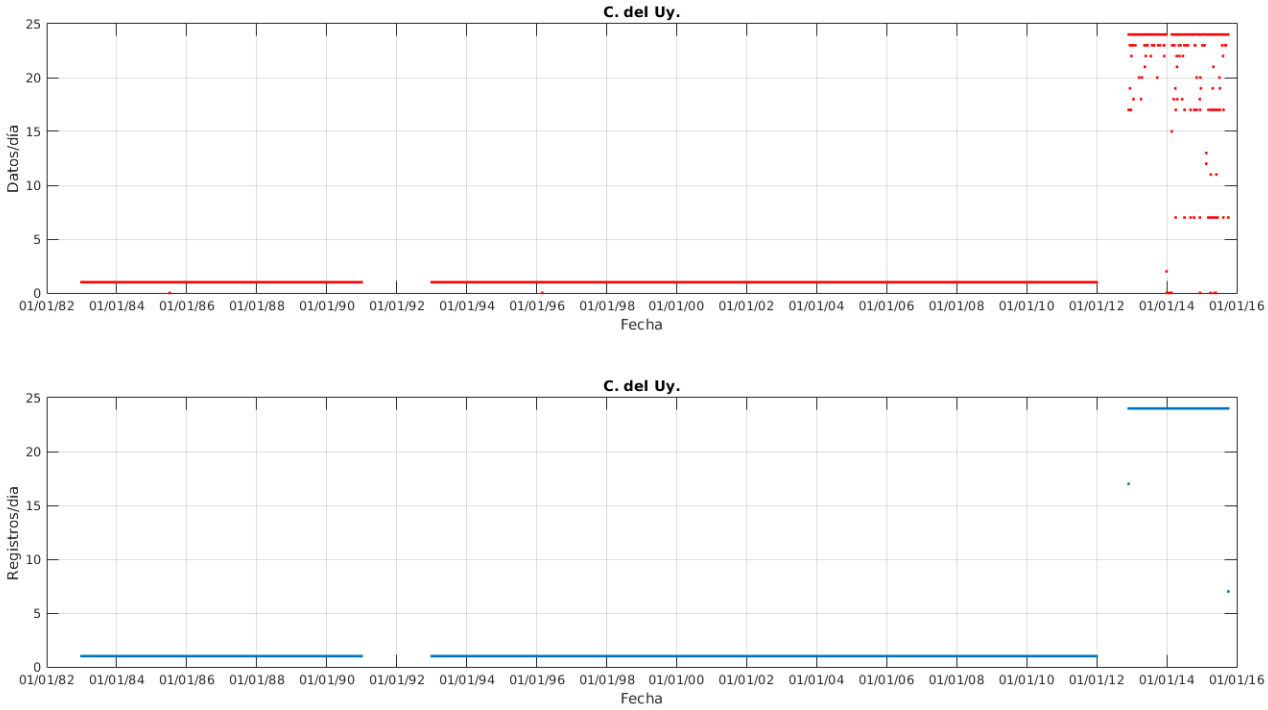


Figura 1.10: Densidad de datos diarios - Concepción del Uruguay.

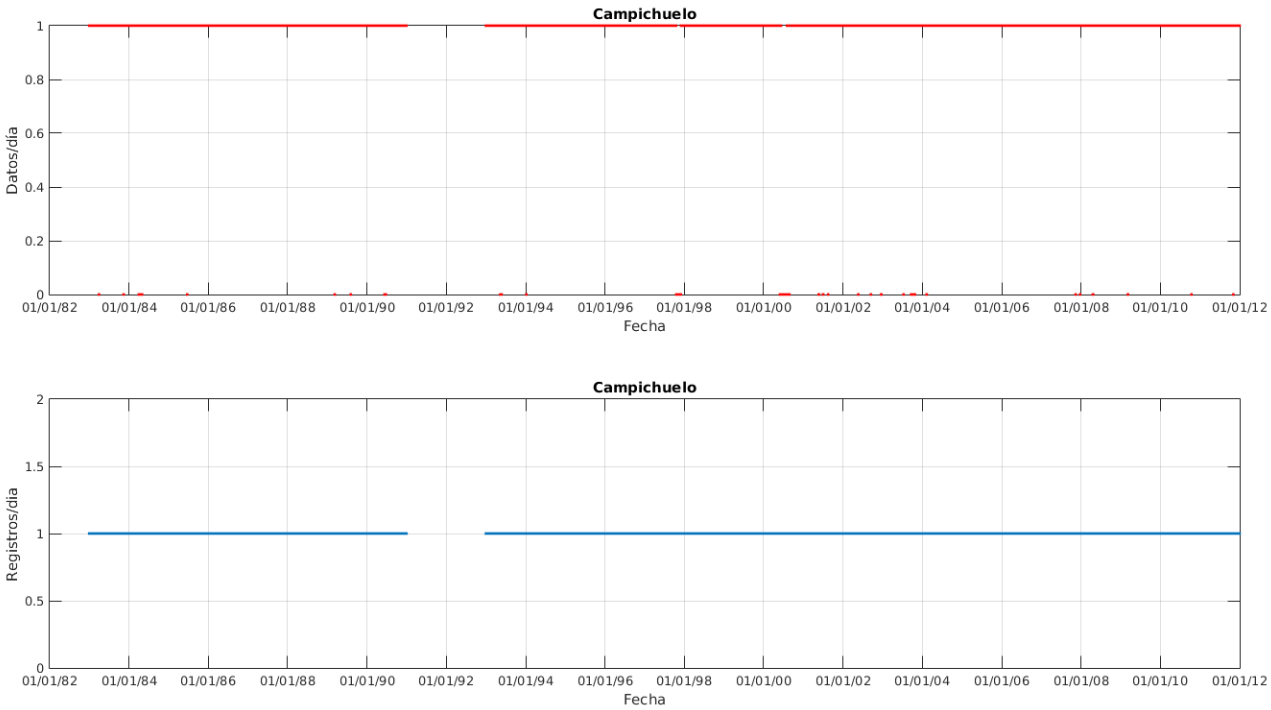


Figura 1.11: Densidad de datos diarios - Campichuelo.

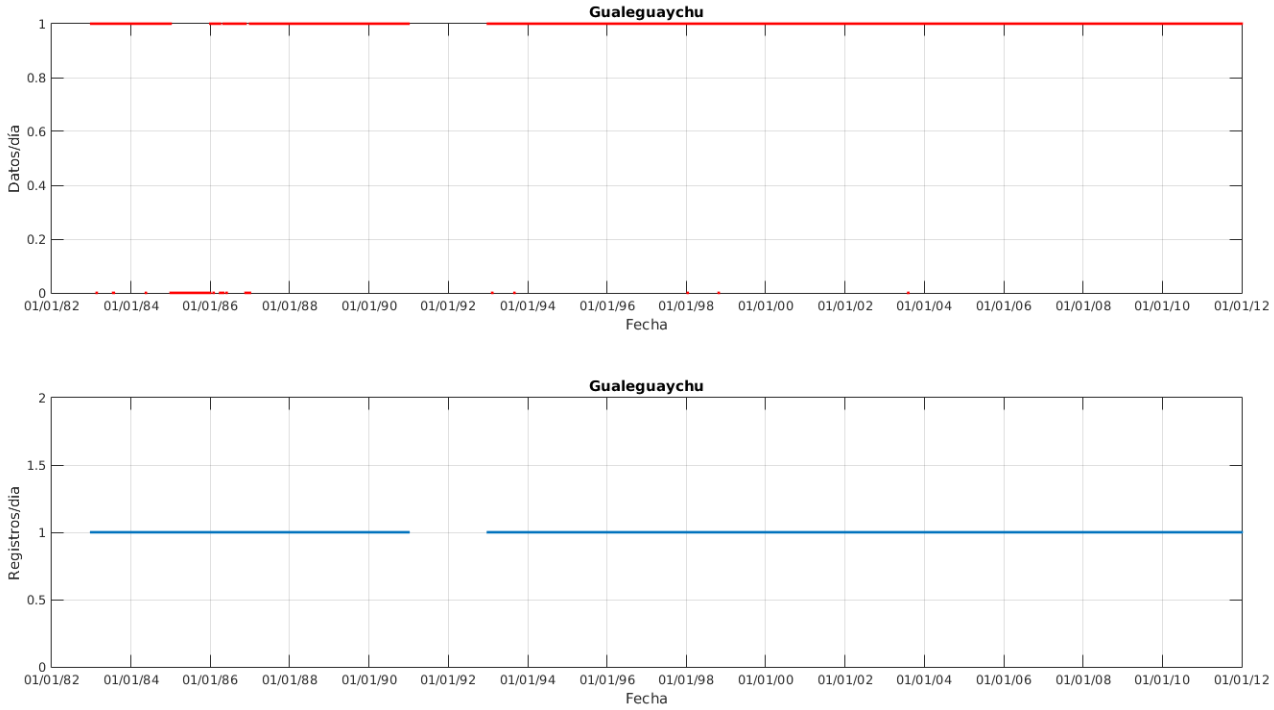


Figura 1.12: Densidad de datos diarios - Gualeguaychú.

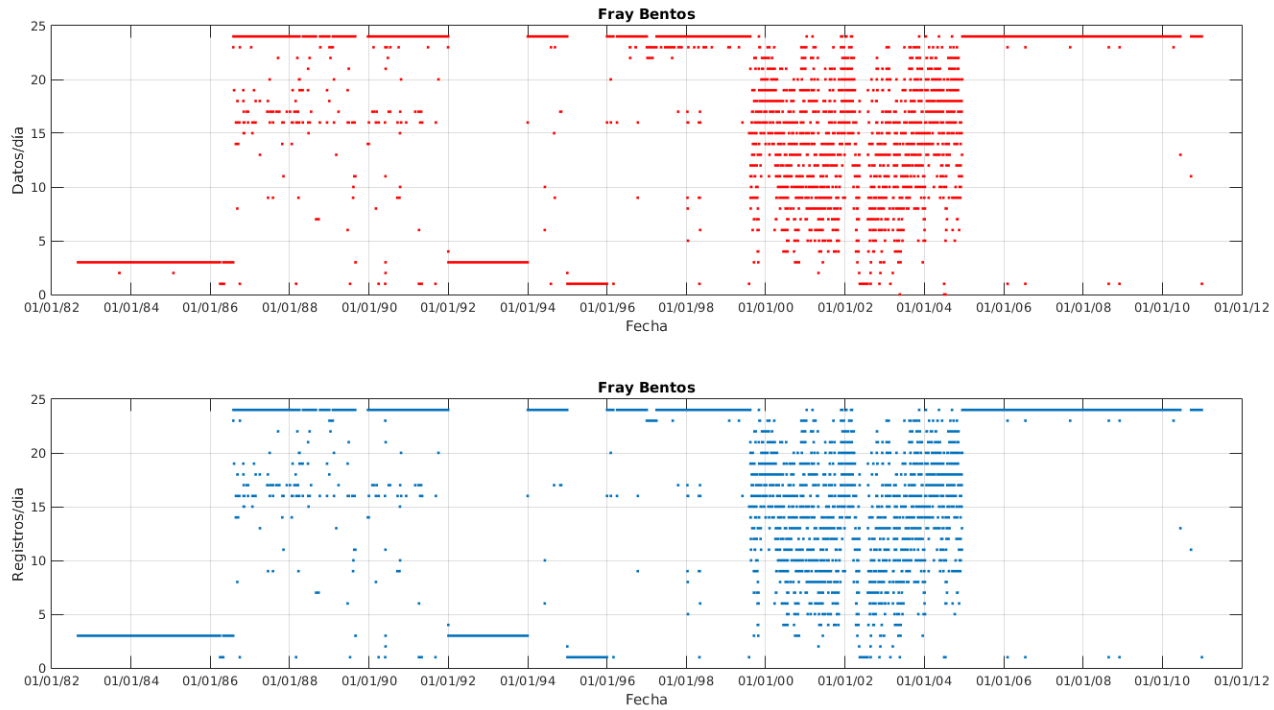


Figura 1.13: Densidad de datos diarios - Fray Bentos.

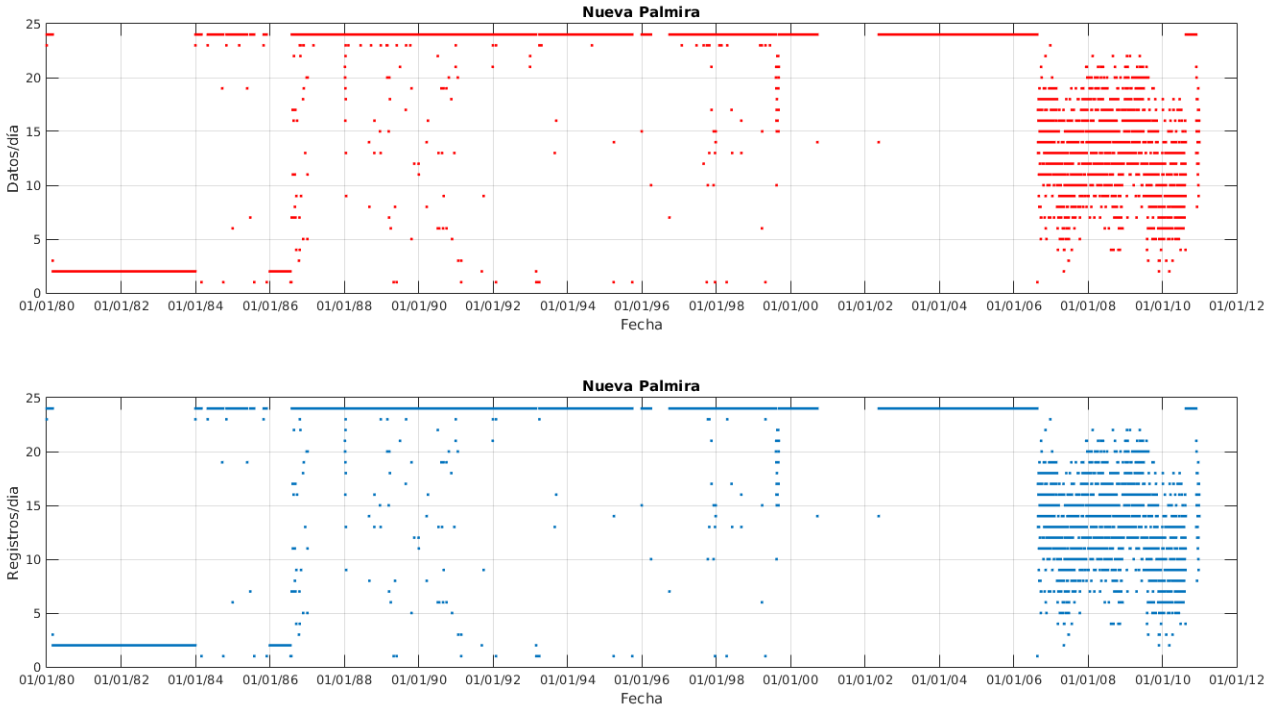


Figura 1.14: Densidad de datos diarios - Nueva Palmira.

1.4. Análisis global comparativo de series de niveles

En este apéndice se realiza un análisis global comparativo de las series de niveles de las estaciones Salto, Concordia, Yeruá, Nueva Escocia, La Calera, Fábrica Colón, Colón, Paysandú, Concepción del Uruguay, Puerto Campichuelo, Fray Bentos, Gualeguaychú y Nueva Palmira. Este análisis busca verificar la consistencia de la totalidad de los datos entre sí y en función de esto depurar posibles errores o anomalías que se detecten en las distintas series, a nivel cualitativo.

Para esto, se generan gráficos de la evolución temporal de las series a escala anual de la siguiente forma:

- Superponiendo las series temporales de estaciones ubicadas en márgenes opuestas del río, aproximadamente en la misma progresiva. A saber: Salto - Concordia, Paysandú - Colón y Fray Bentos – Gualeguaychú. Se mantuvo una escala vertical constante en todos los gráficos de modo de poder compararlos.
- Superponiendo las series temporales de estaciones ubicadas en la misma margen del río, tanto para el lado argentino como para el lado uruguayo. Se mantuvo también una escala vertical constante en todos los gráficos de modo de poder compararlos.

Se realiza un análisis exhaustivo de estos gráficos año a año desde el comienzo del período

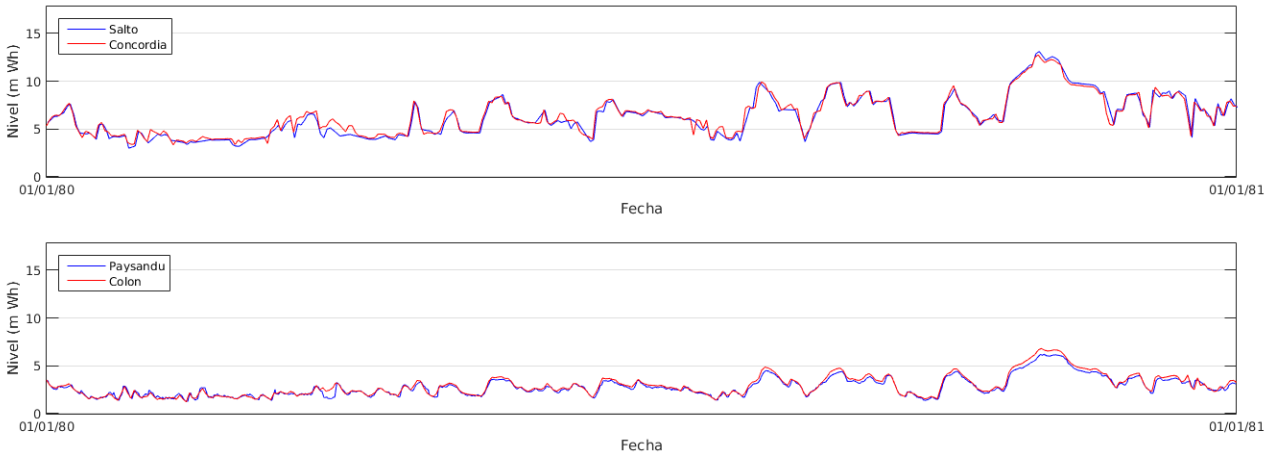


Figura 1.15: Márgenes opuestas - 1980.

de registro en 1980 hasta la última información disponible correspondiente a 2016. Para cada año analizado se hacen observaciones a partir de las cuales se depuran los errores identificados.

1.4.1. 1980

Márgenes opuestas

Para este año no se cuentan con datos de Fray Bentos ni Gualeguaychú. La evolución temporal de las estaciones en márgenes opuestas presenta un comportamiento similar, habiendo poco alejamiento entre las series correspondientes.

Misma margen

Para este año no se cuenta con datos de La Calera, Concepción del Uruguay, Campichuelo, Gualeguaychú ni Fray Bentos. Las restantes estaciones presentan un comportamiento consistente entre sí y no se observan anomalías.

1.4.2. 1981

Márgenes opuestas

Se cuentan con datos de Fray Bentos solamente para los meses de enero, febrero, marzo y abril. Hay poco alejamiento entre las series de estaciones en márgenes opuestas, no registrándose anomalías y presentando un comportamiento consistente entre sí.

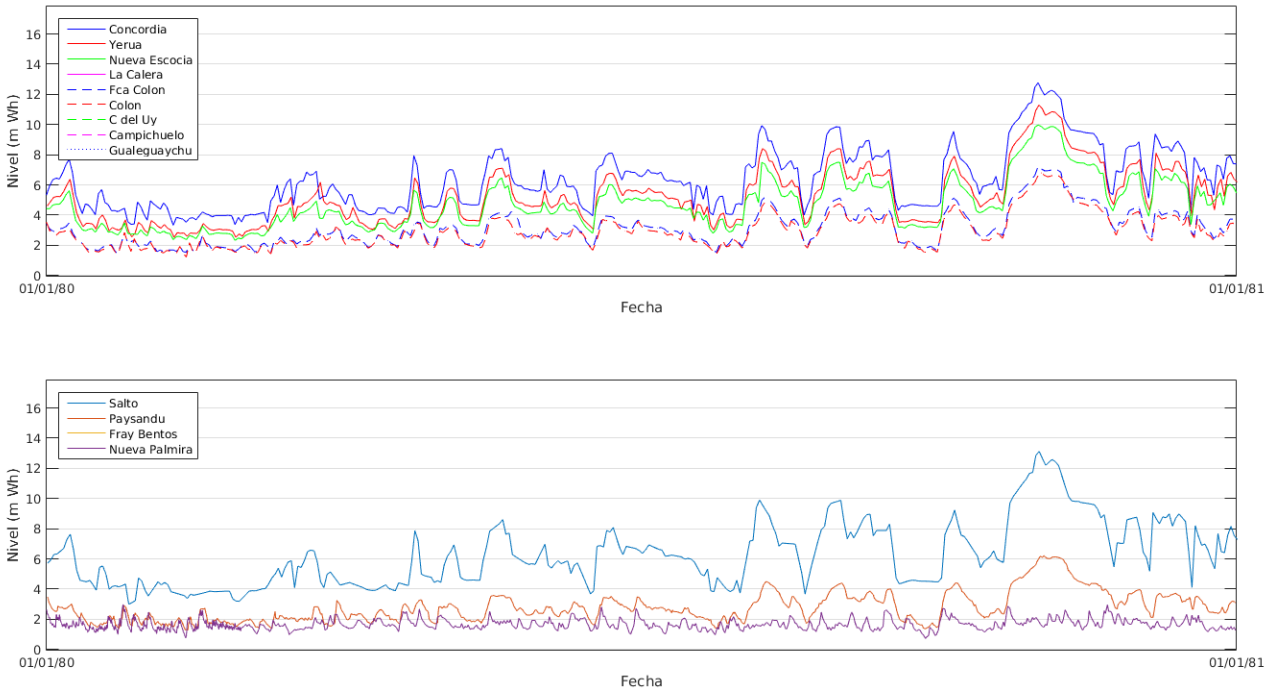


Figura 1.16: Misma margen - 1980.

Misma margen

No se cuenta con datos para La Calera, Concepción del Uruguay, Campichuelo ni Gualeguaychú. Las restantes estaciones presentan un comportamiento consistente entre sí y no se observan anomalías.

1.4.3. 1982

Márgenes opuestas

Para este año se cuenta con datos en Fray Bentos solamente para los últimos cuatro meses, donde la evolución temporal de esta estación y la de Gualeguaychú no presentan un comportamiento similar y tienen un cierto alejamiento. Las demás estaciones presentan un comportamiento similar en su evolución temporal. Se observa sin embargo que los niveles en la estación colón, para niveles mayores a 5 m, presentan un cierto alejamiento de los niveles de la estación Paysandú, que se incrementa a niveles mayores. Lo anterior se podría atribuir a que Colón se encuentra 12 km aguas arriba de Paysandú.

Misma margen

No se cuenta con datos de La Calera para este año. Las series de Concepción del Uruguay, Campichuelo y Gualeguaychú no son consistentes con los demás registros de la serie, por lo que

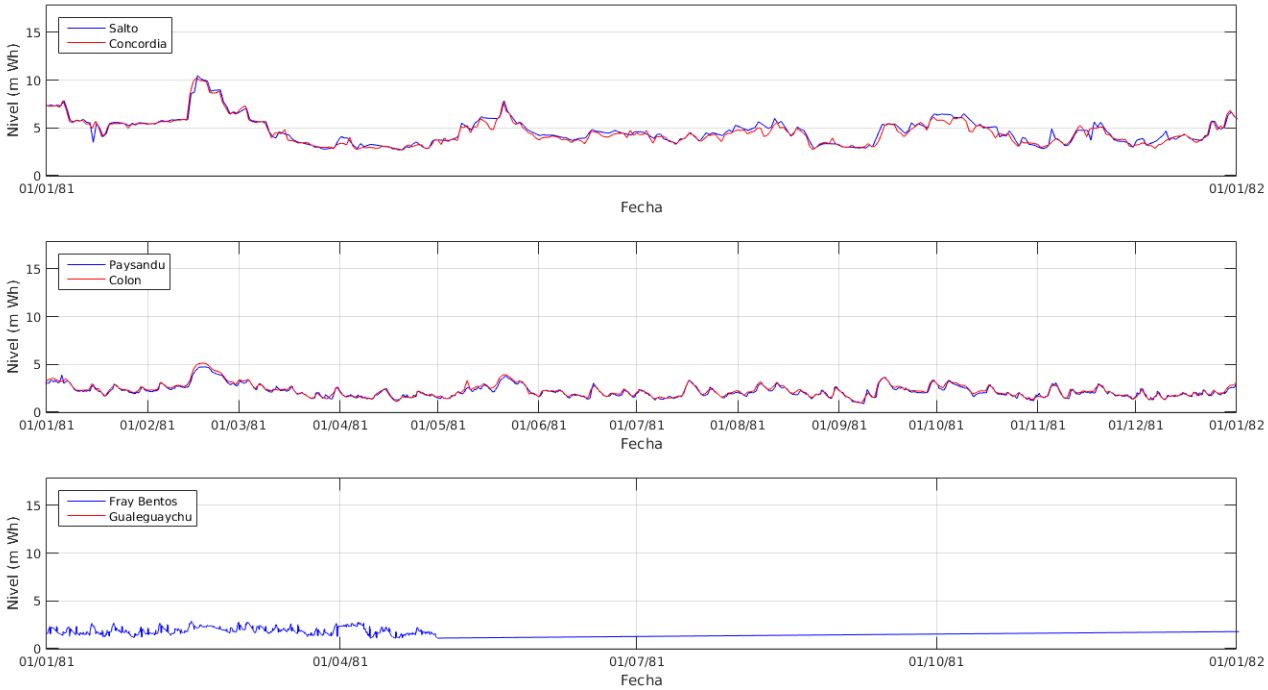


Figura 1.17: Márgenes opuestas - 1981.

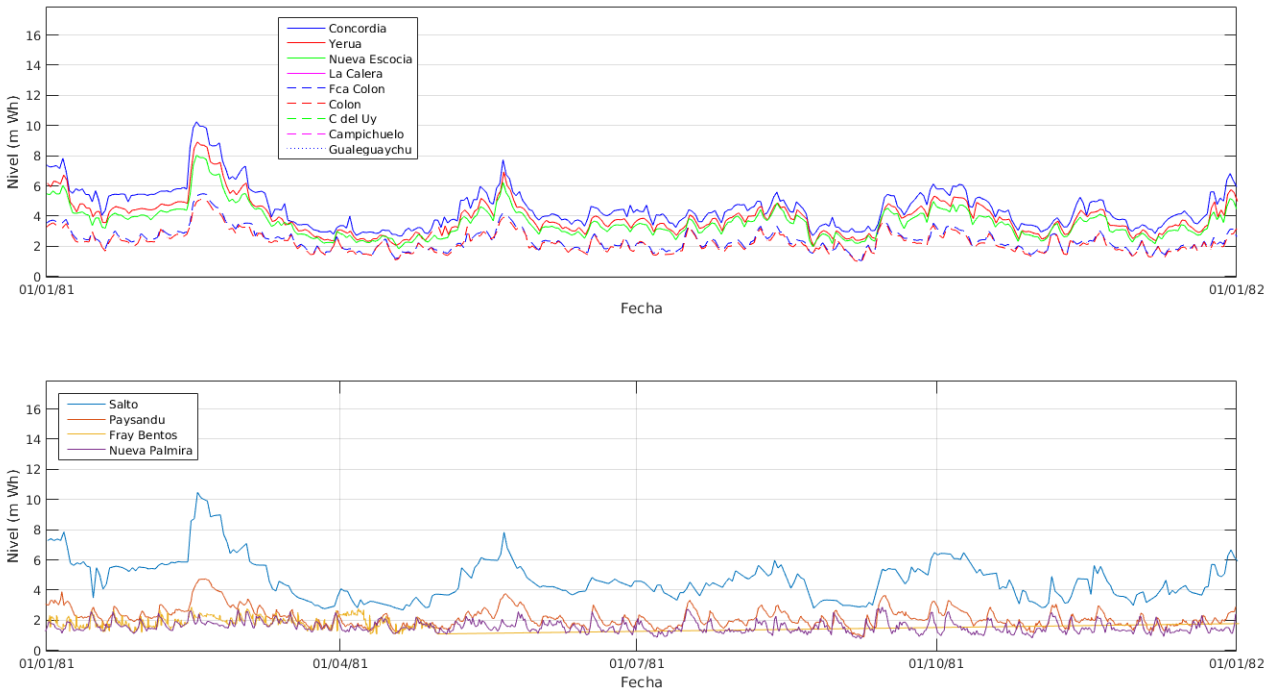


Figura 1.18: Misma margen - 1981.

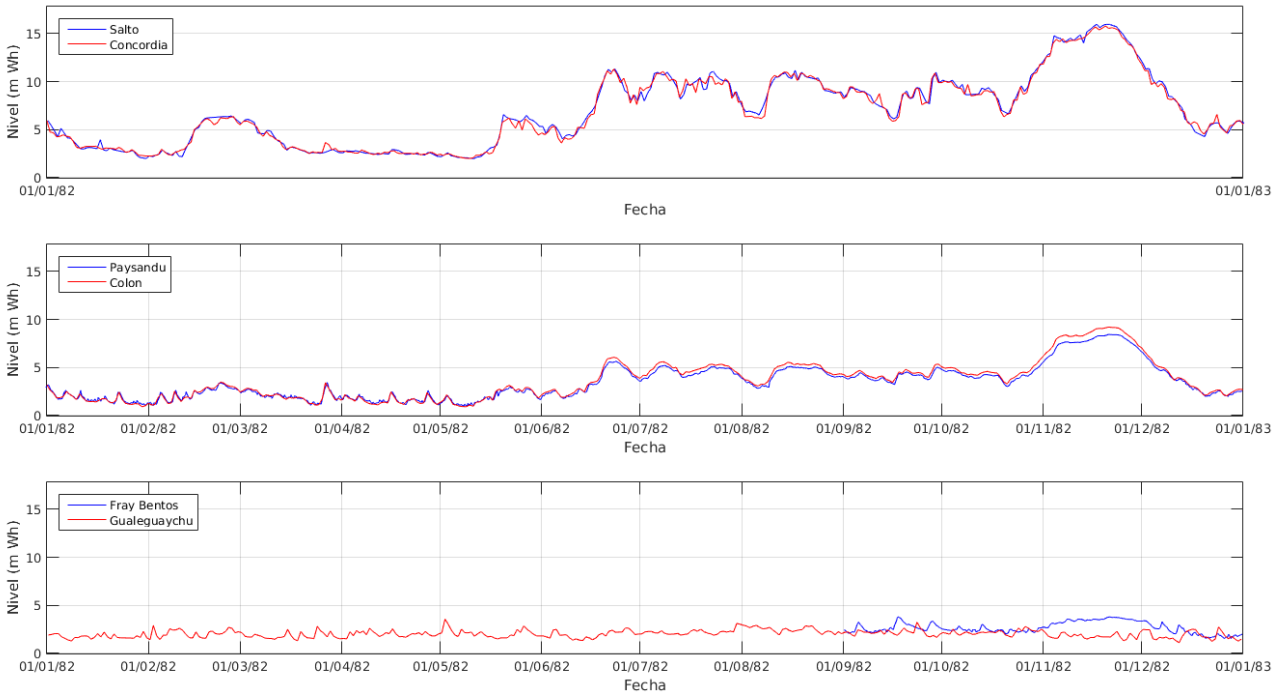


Figura 1.19: Márgenes opuestas - 1982.

se entiende que estos datos son erróneos.

1.4.4. 1983

Márgenes opuestas

Se cuenta con datos para todos los meses del año, presentando Gualeguaychú un corte de unos días en el mes de julio. Las estaciones en márgenes opuestas presentan un comportamiento similar en términos de su evolución temporal. Se observa, como en el caso anterior, un cierto alejamiento que aumenta a medida que aumenta el nivel para el caso de Colón y Paysandú. Las distintas estaciones presentan un comportamiento consistente entre sí.

Misma margen

No se cuenta con datos para la estación de La Calera. Las restantes estaciones presentan un comportamiento consistente entre sí y no se observan anomalías.

1.4.5. 1984

Márgenes opuestas

Se cuenta con datos para todos los meses del año. Las estaciones en márgenes opuestas presentan un comportamiento similar en términos de su evolución temporal. Se observa, como

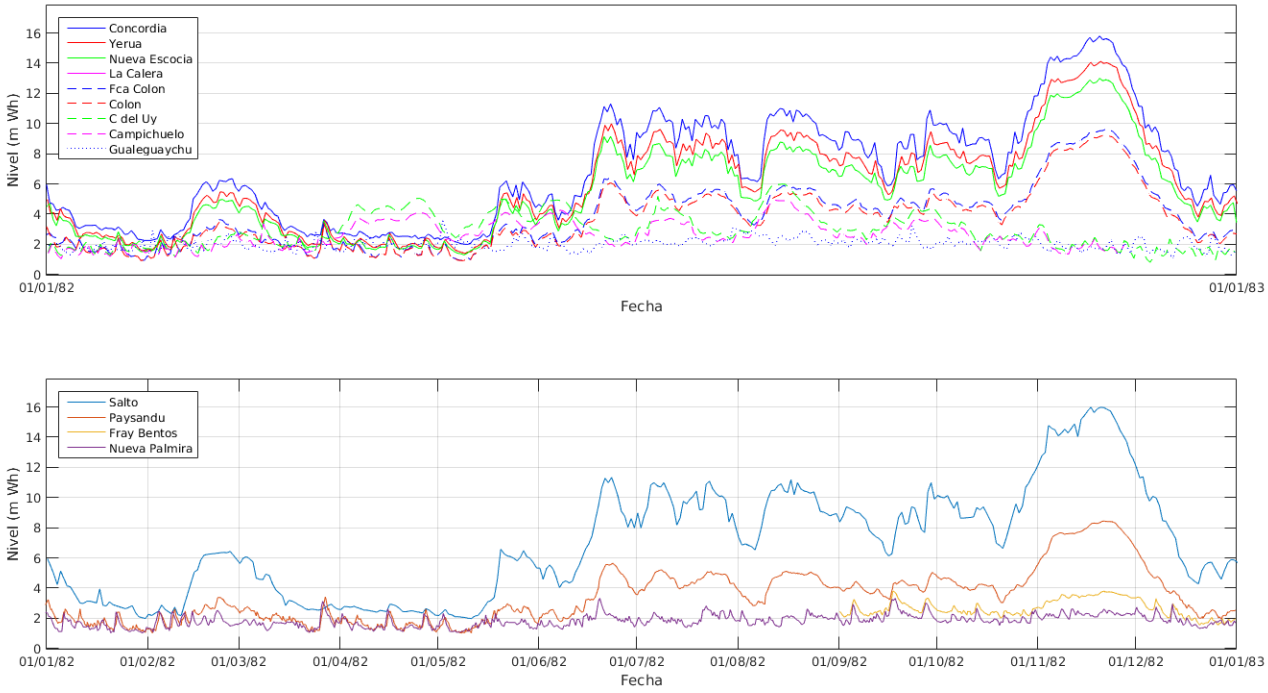


Figura 1.20: Misma margen - 1982.

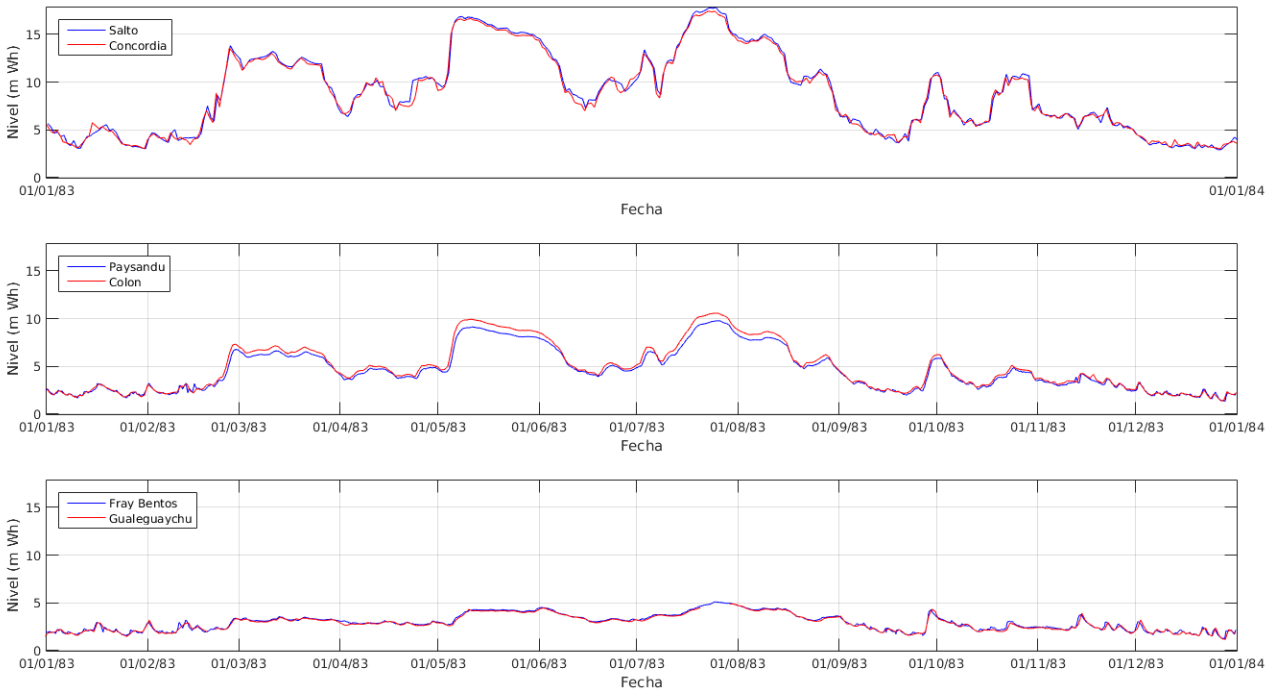


Figura 1.21: Márgenes opuestas - 1983.

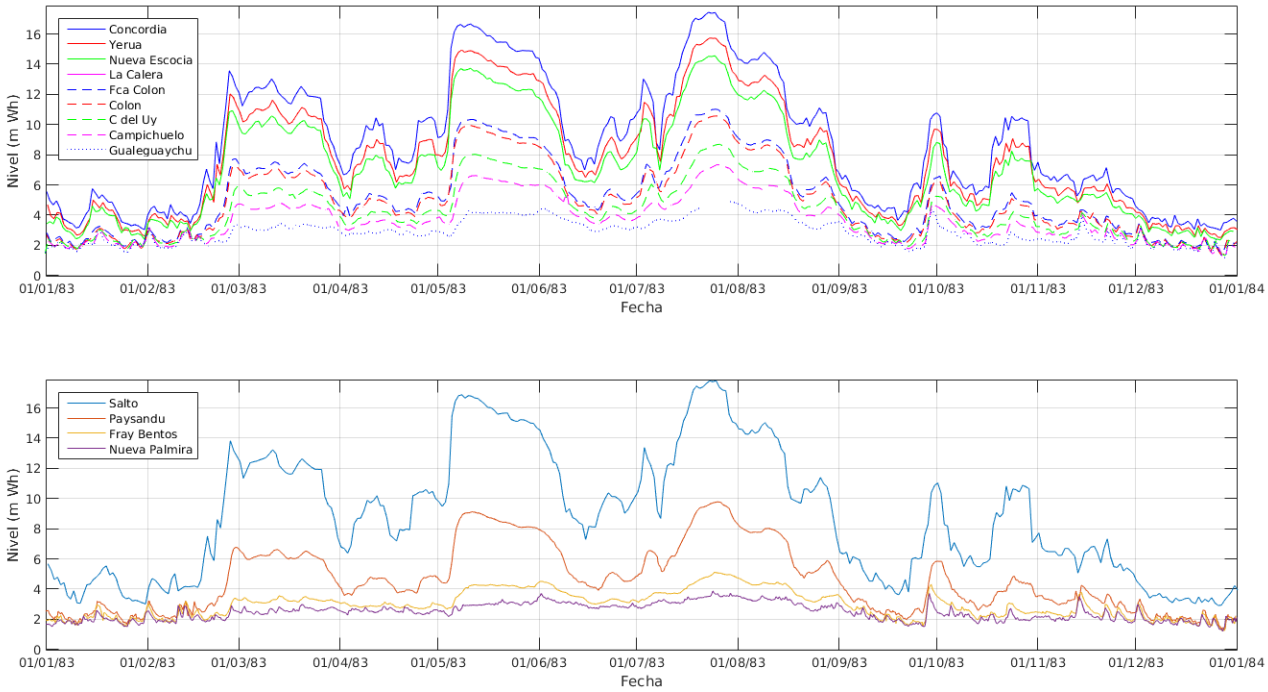


Figura 1.22: Misma margen - 1983.

en el caso anterior, un cierto alejamiento que aumenta a medida que aumenta el nivel para el caso de Colón y Paysandú. Las distintas estaciones presentan un comportamiento consistente entre sí.

Misma margen

No se cuenta con datos para la estación de La Calera. Nueva Palmira carece de datos en los meses de marzo, abril y octubre. Las restantes estaciones presentan un comportamiento consistente entre sí y no se observan anomalías.

1.4.6. 1985

Márgenes opuestas

No se cuentan con datos de la estación Gualeguaychú. Las estaciones en márgenes opuestas presentan un comportamiento similar en términos de su evolución temporal. Se observa, como en el caso anterior, un cierto alejamiento que aumenta a medida que aumenta el nivel para el caso de Colón y Paysandú. Las distintas estaciones presentan un comportamiento consistente entre sí.

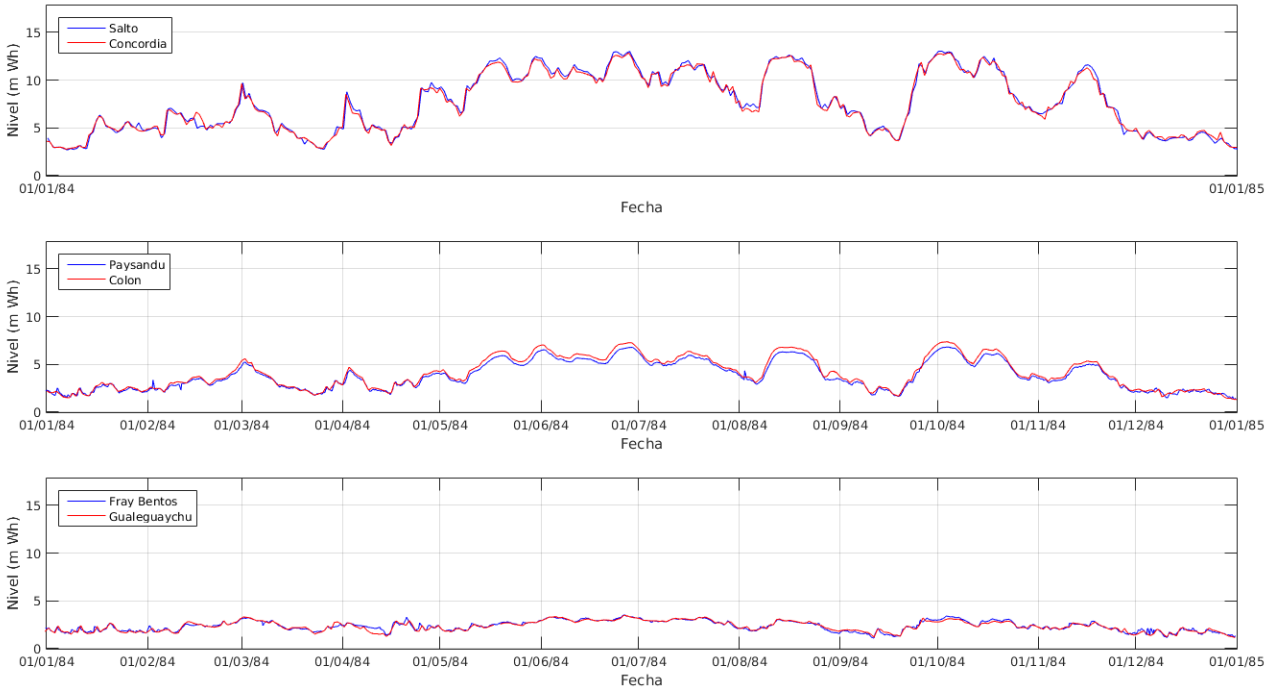


Figura 1.23: Márgenes opuestas - 1984.

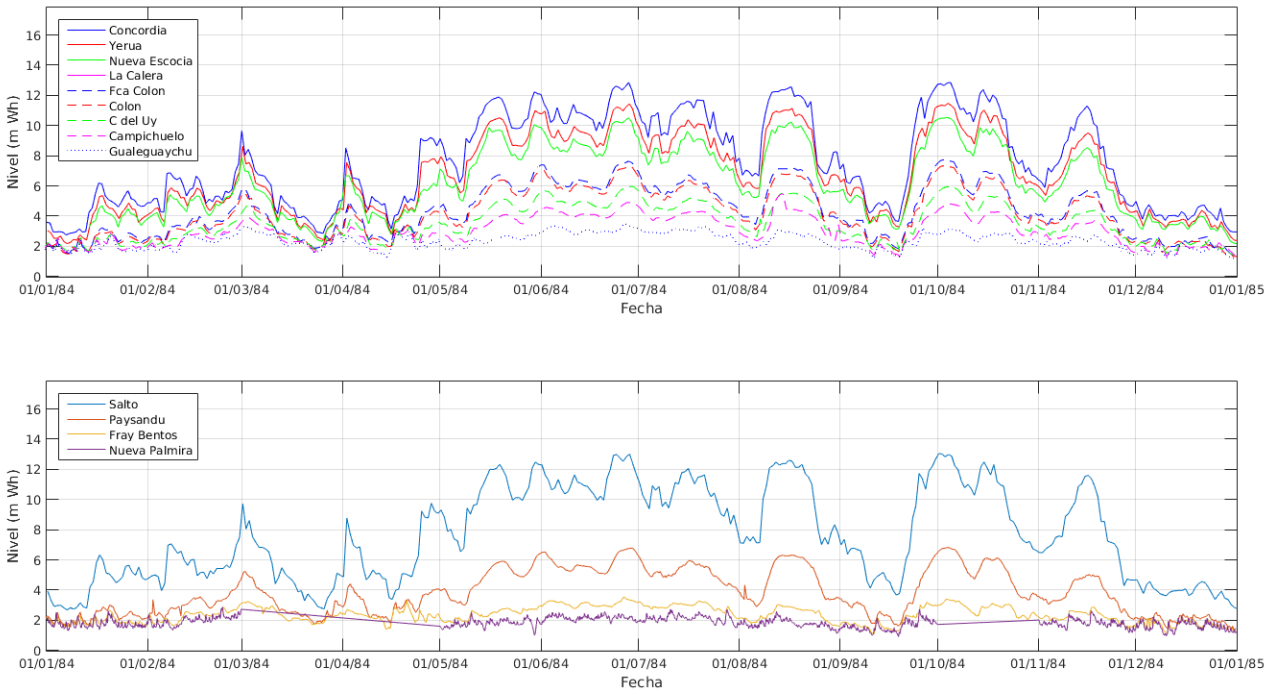


Figura 1.24: Misma margen - 1984.

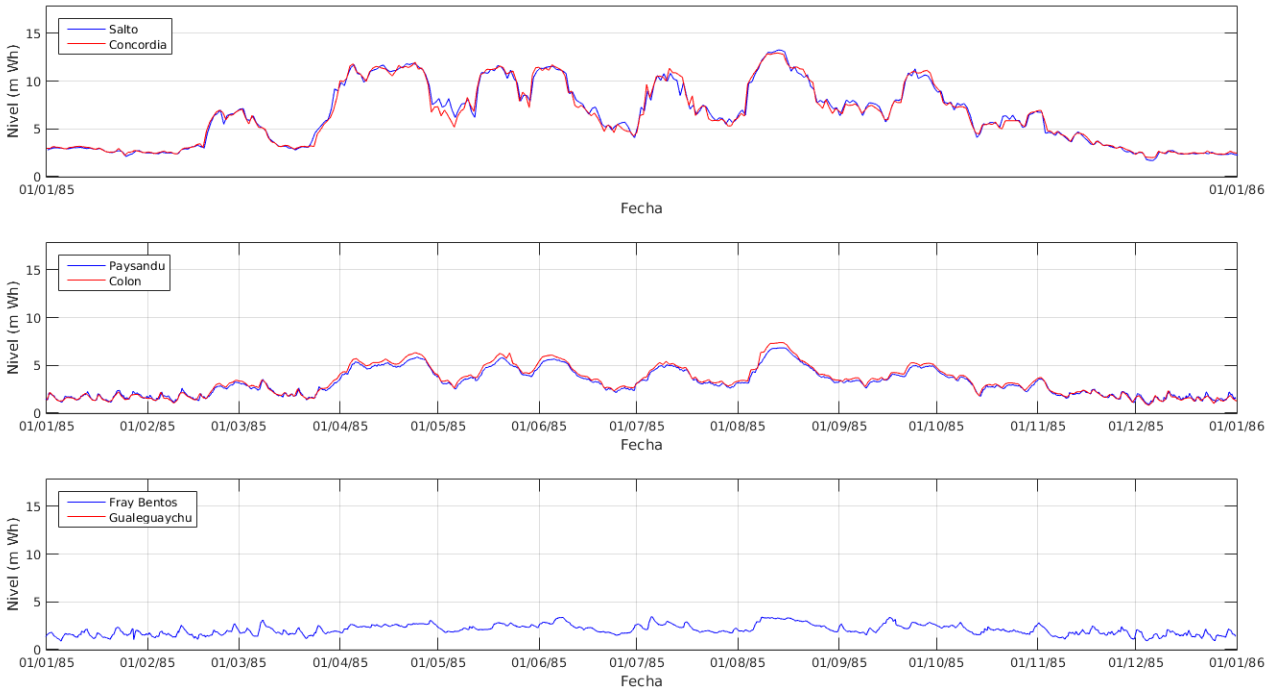


Figura 1.25: Márgenes opuestas - 1985.

Misma margen

No se cuenta con datos para La Calera. Nueva Palmira presenta vacíos en los meses de mayo, junio, agosto, setiembre, octubre y diciembre. Se observan anomalías en los registros de Nueva Escocia, asociadas a valores muy por debajo de lo esperable respecto a la curva de evolución temporal. Las restantes estaciones presentan un comportamiento consistente entre sí.

1.4.7. 1986

Márgenes opuestas

La serie de niveles de Gualeguaychú presenta algunos vacíos en los meses de abril, noviembre y diciembre. Las estaciones en márgenes opuestas presentan un comportamiento similar en términos de su evolución temporal. Se observa, como en el caso anterior, un cierto alejamiento que aumenta a medida que aumenta el nivel para el caso de Colón y Paysandú. Las distintas estaciones presentan un comportamiento consistente entre sí. A partir de agosto Salto presenta un aumento en la densidad de datos, comenzando a registrarse tres datos por día, lo cual permite apreciar mejor las oscilaciones de niveles de períodos menores, comenzándose a vislumbrar un ciclo diario, asociado a la demanda energética y el caudal turbinado por la central hidroeléctrica de Salto Grande.

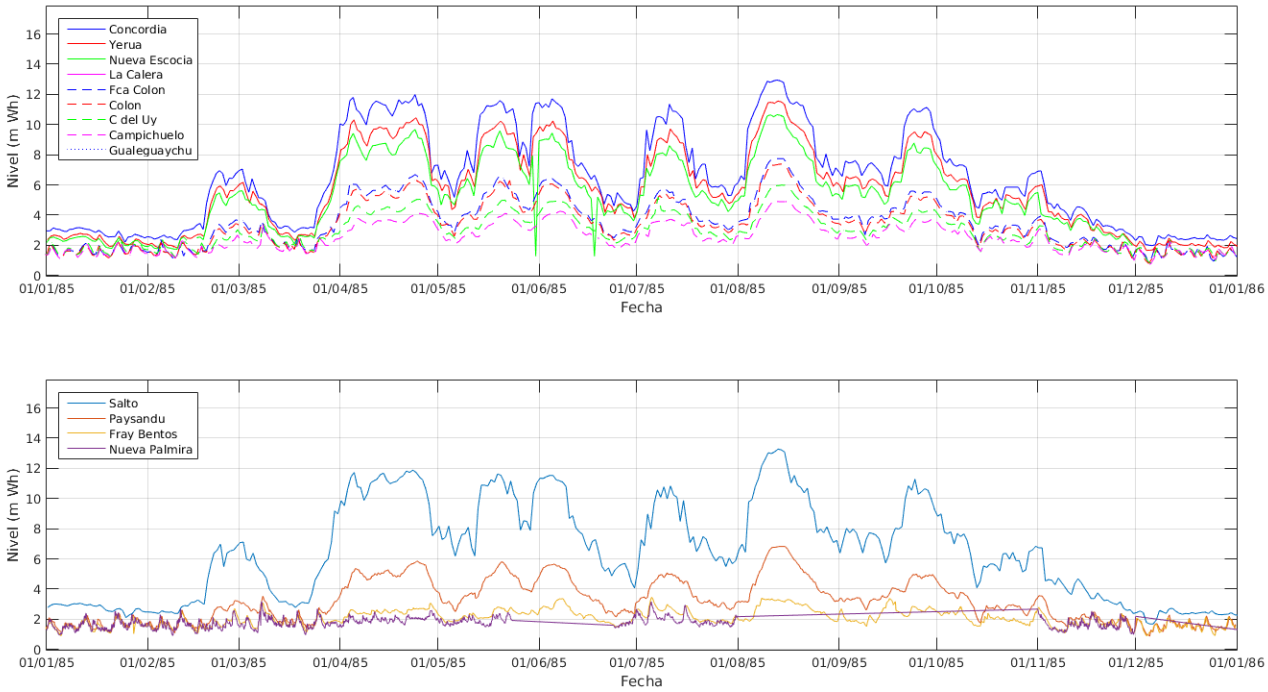


Figura 1.26: Misma margen - 1985.

Misma margen

No se cuenta con datos para la estación de La Calera. Las restantes estaciones presentan un comportamiento consistente entre sí y no se observan anomalías.

1.4.8. 1987

Márgenes opuestas

Se cuentan con datos para todas las estaciones. Las estaciones en márgenes opuestas presentan un comportamiento similar en términos de su evolución temporal. Se observa un cierto alejamiento que aumenta a medida que aumenta el nivel para el caso de Colón y Paysandú. Las distintas estaciones presentan un comportamiento consistente entre sí.

Misma margen

No se cuenta con datos para la estación de La Calera. Las restantes estaciones presentan un comportamiento consistente entre sí y no se observan anomalías.

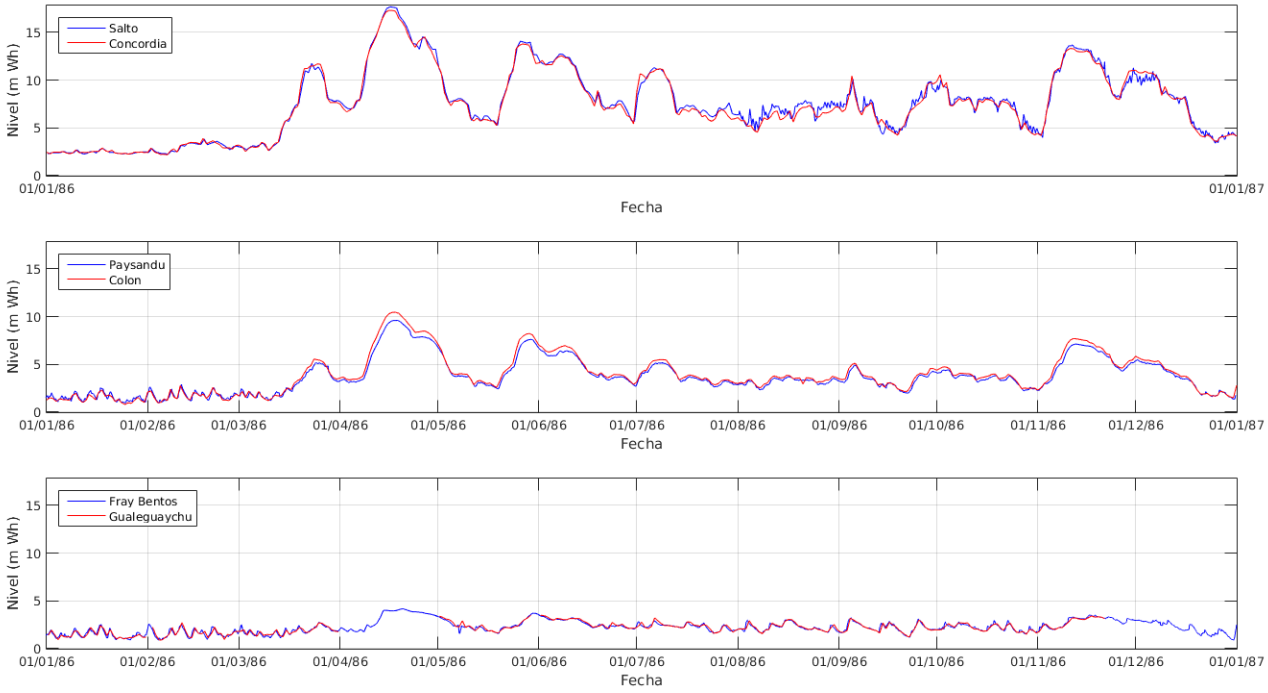


Figura 1.27: Márgenes opuestas - 1986.

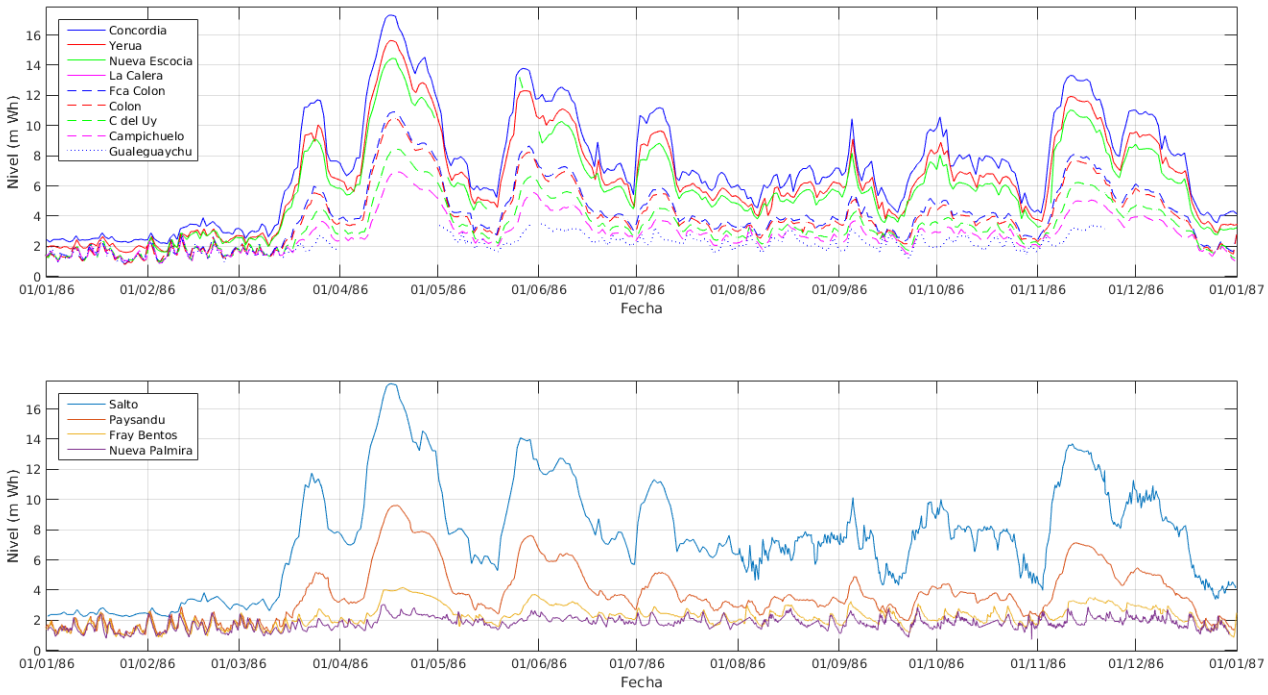


Figura 1.28: Misma margen - 1986.

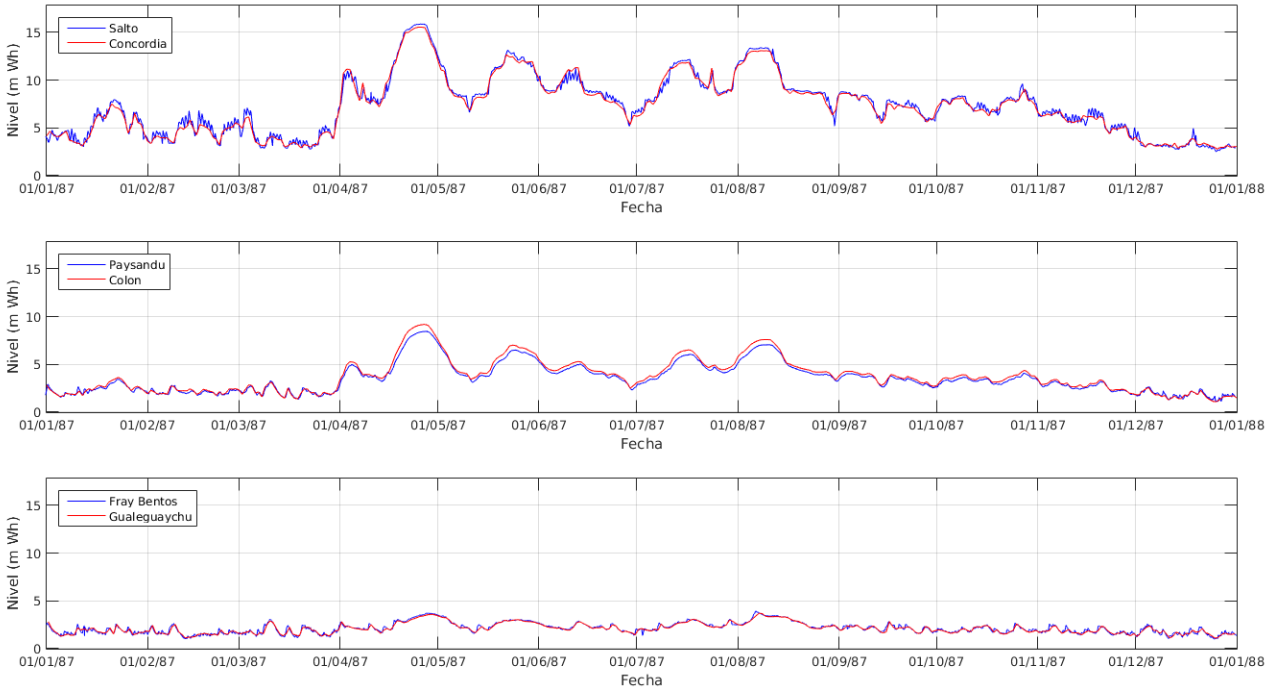


Figura 1.29: Márgenes opuestas - 1987.

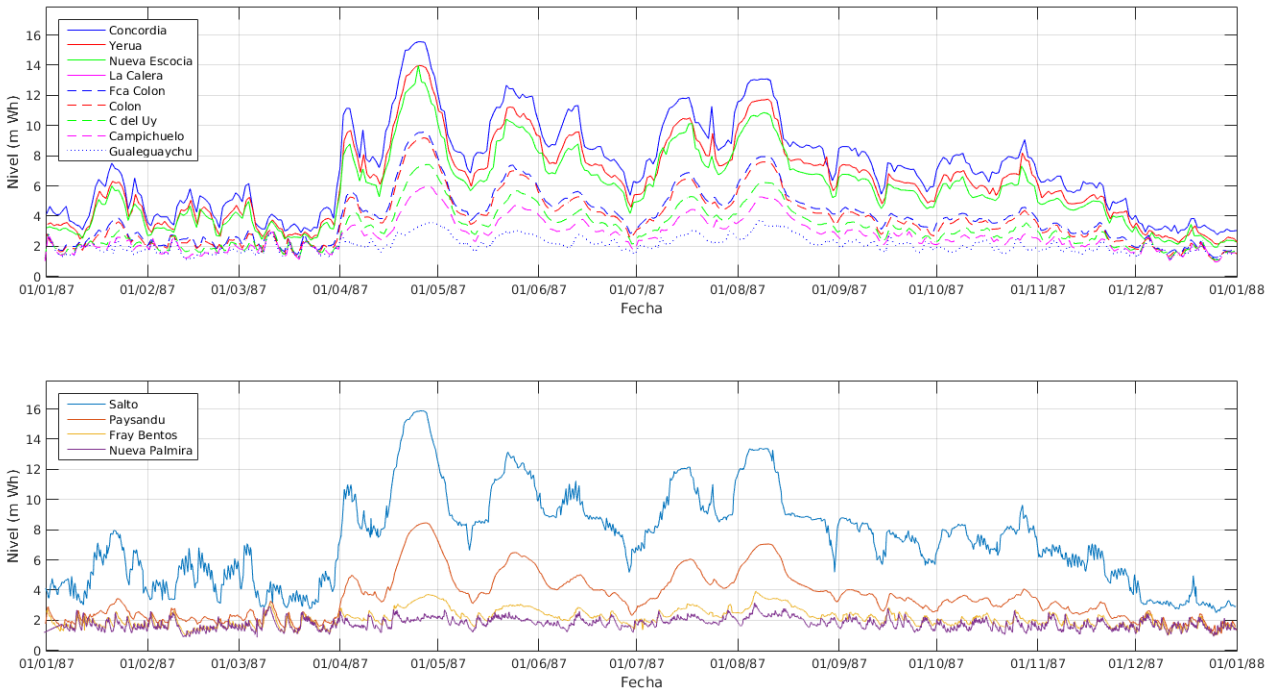


Figura 1.30: Misma margen - 1987.

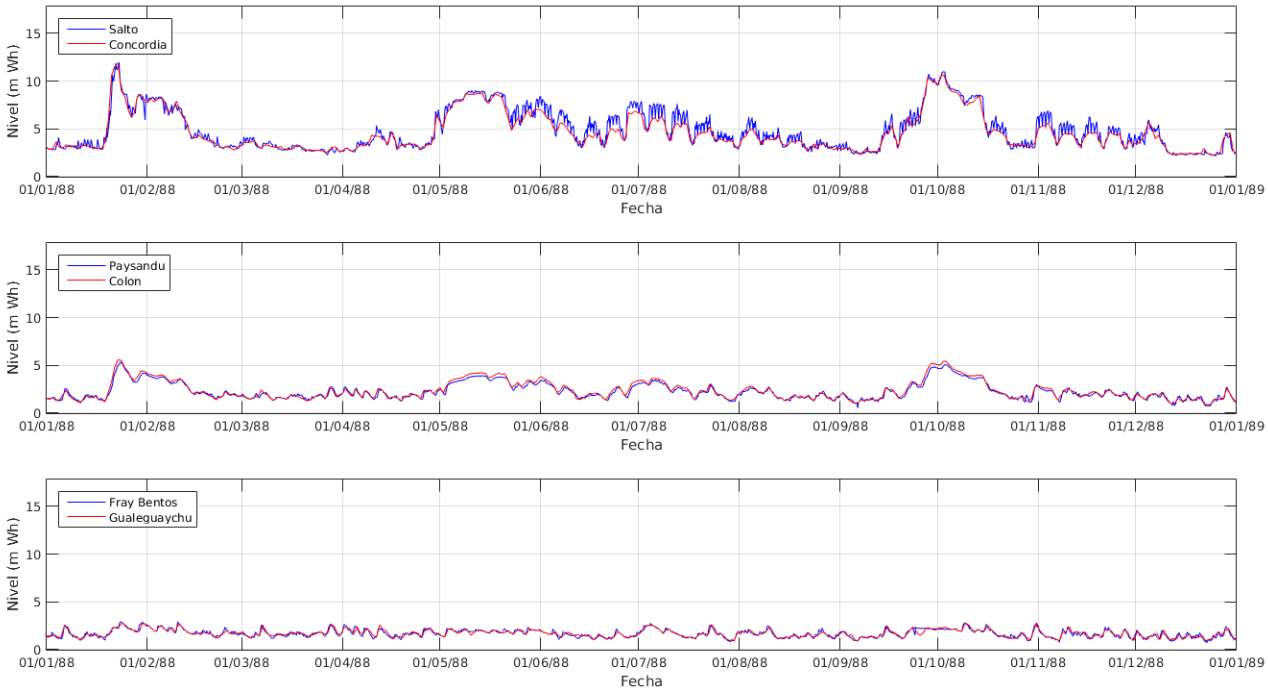


Figura 1.31: Márgenes opuestas - 1988.

1.4.9. 1988

Márgenes opuestas

Se cuenta con datos para todas las estaciones, excepto por un vacío en la estación Fray Bentos a finales de setiembre y principios de octubre. Las estaciones en márgenes opuestas presentan un comportamiento similar en términos de su evolución temporal. Se observa un cierto alejamiento que aumenta a medida que aumenta el nivel para el caso de Colón y Paysandú. Las distintas estaciones presentan un comportamiento consistente entre sí. A partir de mayo se comienzan a registrar cuatro lecturas por día en la estación de Salto, lo cual permite visualizar la variación de niveles a escala diaria, asociado a la demanda energética y el caudal turbinado por la central hidroeléctrica de Salto Grande.

Misma margen

No se cuenta con datos para la estación de La Calera. Las restantes estaciones presentan un comportamiento consistente entre sí y no se observan anomalías.

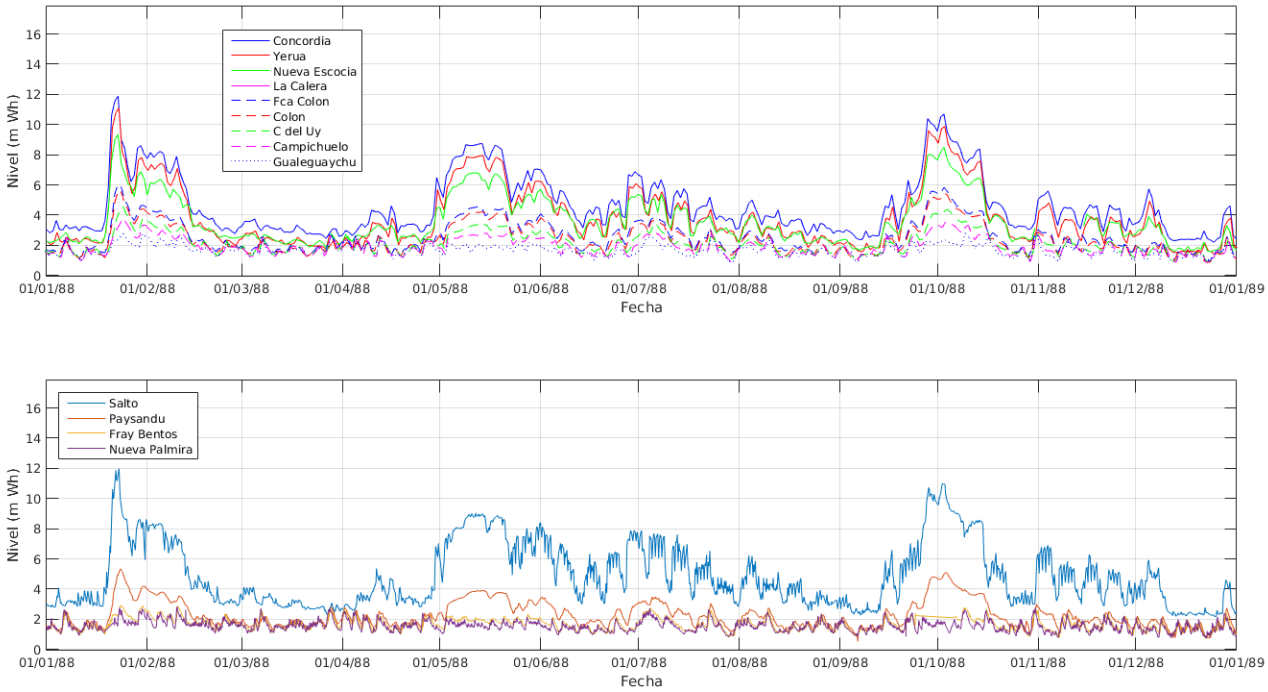


Figura 1.32: Misma margen - 1988.

1.4.10. 1989

Márgenes opuestas

Se cuenta con datos para todas las estaciones, excepto para Fray Bentos en los meses de setiembre, octubre y noviembre. Las estaciones en márgenes opuestas presentan un comportamiento similar en términos de su evolución temporal. Se observa un cierto alejamiento que aumenta a medida que aumenta el nivel para el caso de Colón y Paysandú. Las distintas estaciones presentan un comportamiento consistente entre sí. Tanto Salto como Paysandú cuentan con 4 registros diarios, lo cual permite observar que las variaciones de nivel con períodos menores al diario son filtradas en el transcurso de las ondas entre estas estaciones.

Misma margen

No se cuenta con datos para la estación de La Calera. Las restantes estaciones presentan un comportamiento consistente entre sí y no se observan anomalías.

1.4.11. 1990

Márgenes opuestas

Se cuenta con datos para todas las estaciones. Las estaciones en márgenes opuestas presentan un comportamiento similar en términos de su evolución temporal. Se observa un cierto

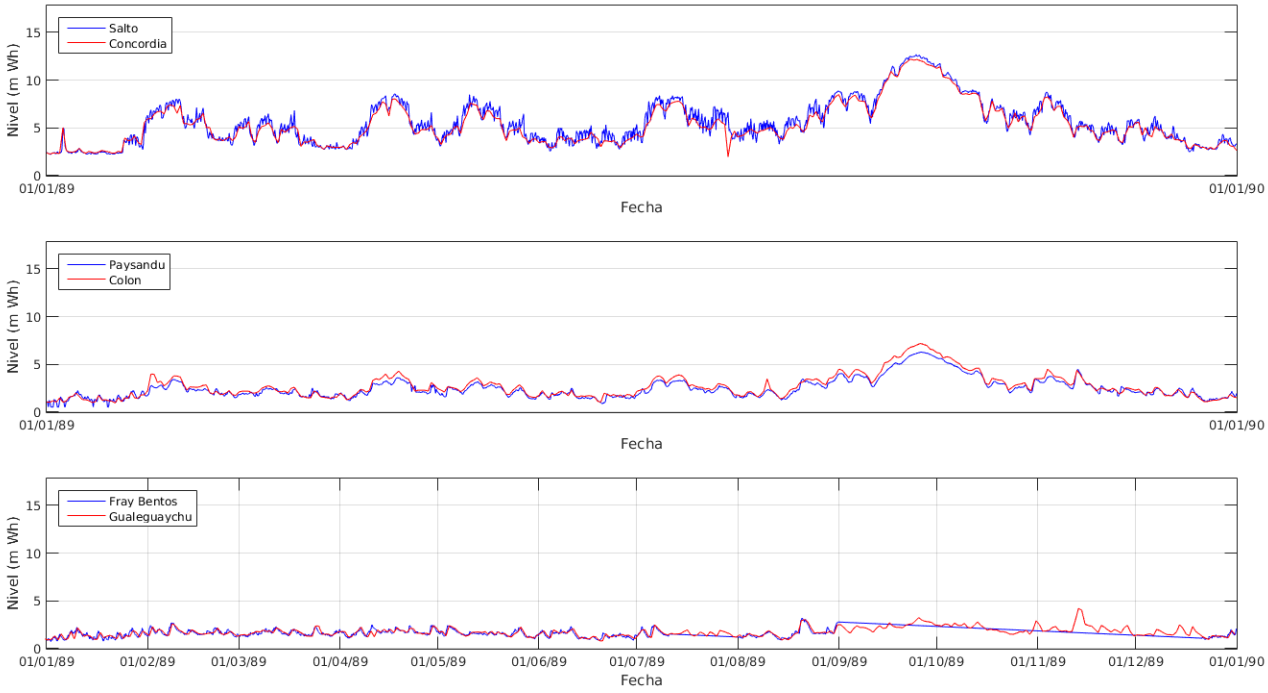


Figura 1.33: Márgenes opuestas - 1989.

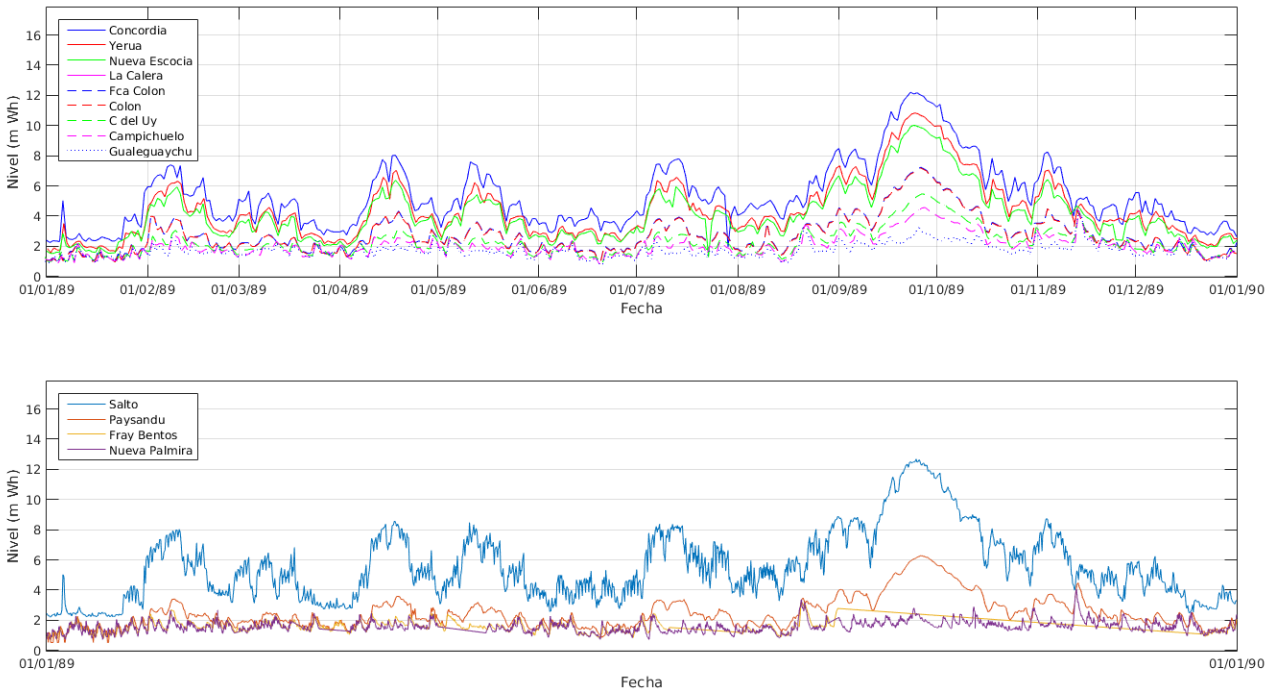


Figura 1.34: Misma margen - 1989.

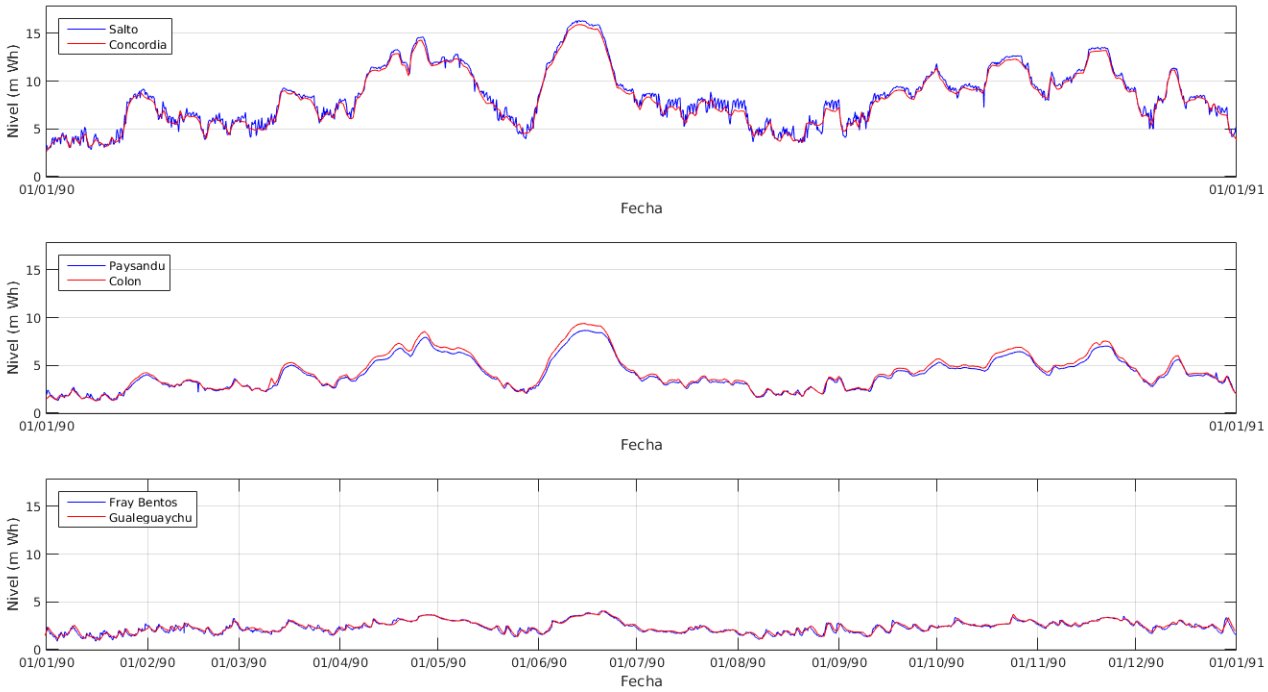


Figura 1.35: Márgenes opuestas - 1990.

alejamiento que aumenta a medida que aumenta el nivel para el caso de Colón y Paysandú. Las distintas estaciones presentan un comportamiento consistente entre sí.

Misma margen

No se cuenta con datos para la estación de La Calera. Nueva Palmira presenta vacíos en los meses de julio, agosto y noviembre. Las restantes estaciones presentan un comportamiento consistente entre sí y no se observan anomalías.

1.4.12. 1991

Márgenes opuestas

Se cuenta con datos para todas las estaciones. Las estaciones en márgenes opuestas presentan un comportamiento similar en términos de su evolución temporal. Se observa un cierto alejamiento que aumenta a medida que aumenta el nivel para el caso de Colón y Paysandú. Las distintas estaciones presentan un comportamiento consistente entre sí.

Misma margen

No se cuenta con datos para la estación de La Calera, Nueva Escocia presenta vacíos para los meses de junio, octubre, noviembre y diciembre, Nueva Palmira presenta vacíos en el mes de

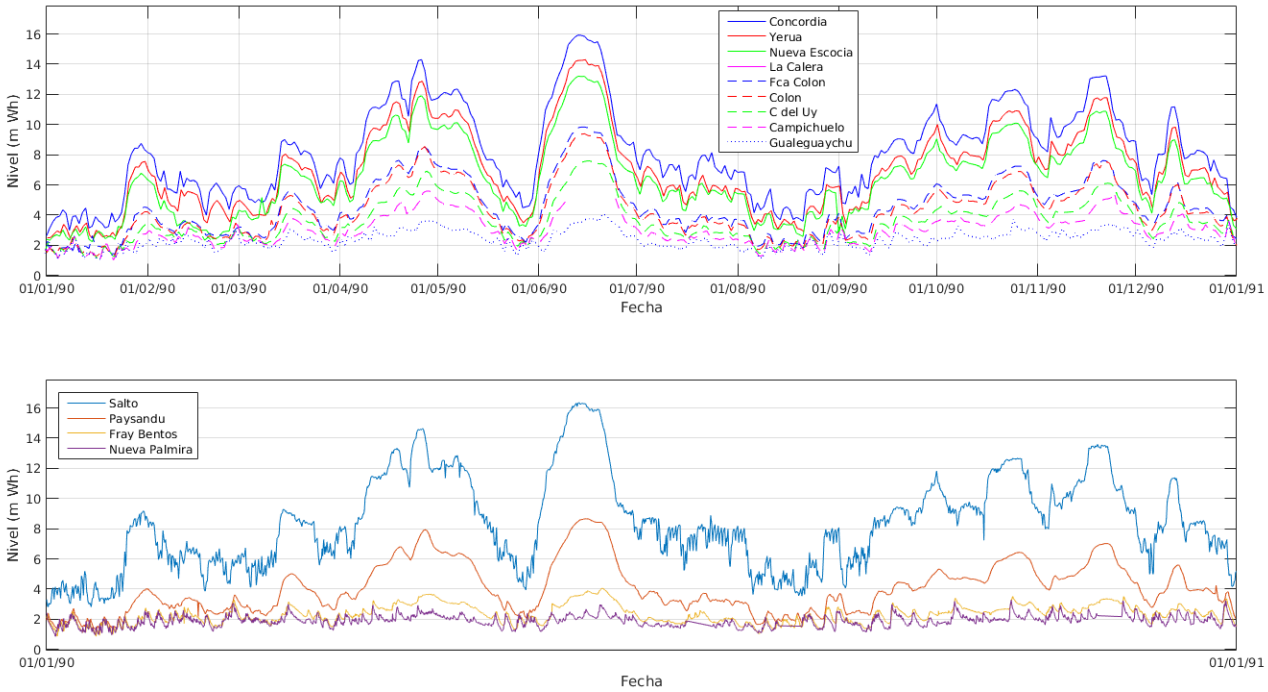


Figura 1.36: Misma margen - 1990.

setiembre. El comportamiento de los registros en Concepción del Uruguay y Campichuelo no se condice con la evolución temporal en las demás estaciones, por lo cual se entiende que éstos son erróneos. Las restantes estaciones presentan un comportamiento consistente entre sí y no se observan anomalías.

1.4.13. 1992

Márgenes opuestas

Se cuenta con datos para todas las estaciones, excepto para el caso de Paysandú que presenta vacíos en algunos meses del año. Se observan algunas anomalías en la serie correspondiente a Paysandú, habiendo algunos niveles puntuales que se encuentran por debajo o por encima del valor esperable de la curva de evolución temporal. Las parejas Salto – Concordia y Paysandú – Colón presentan un comportamiento similar en términos de su evolución temporal, observándose un alejamiento de los niveles de Colón respecto a los de Paysandú que aumentan cuando incrementa el nivel registrado, lo que es consistente con el comportamiento observado en los años anteriores. Las series de estas parejas son consistentes entre sí. Para el caso de Fray Bentos – Gualeguaychú se observa un alejamiento entre las curvas de evolución temporal y comportamientos que no se asemejan entre sí, entendiéndose que los registros en Gualeguaychú podrían ser erróneos.

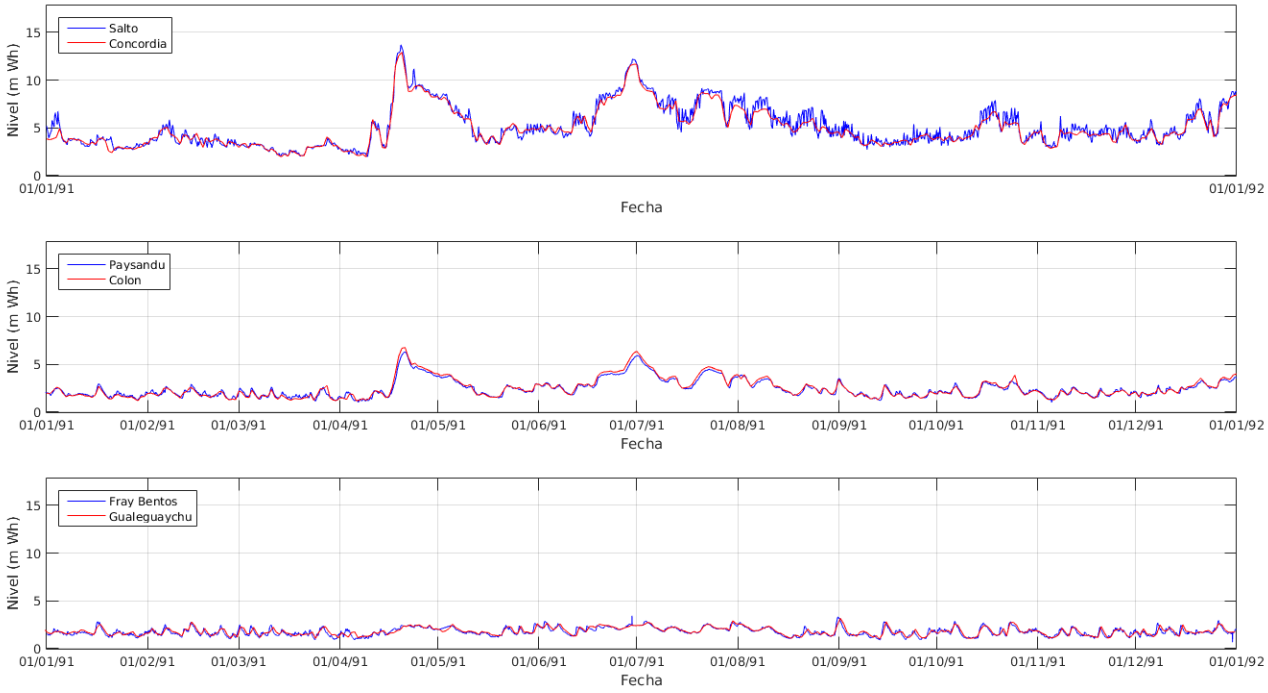


Figura 1.37: Márgenes opuestas - 1991.

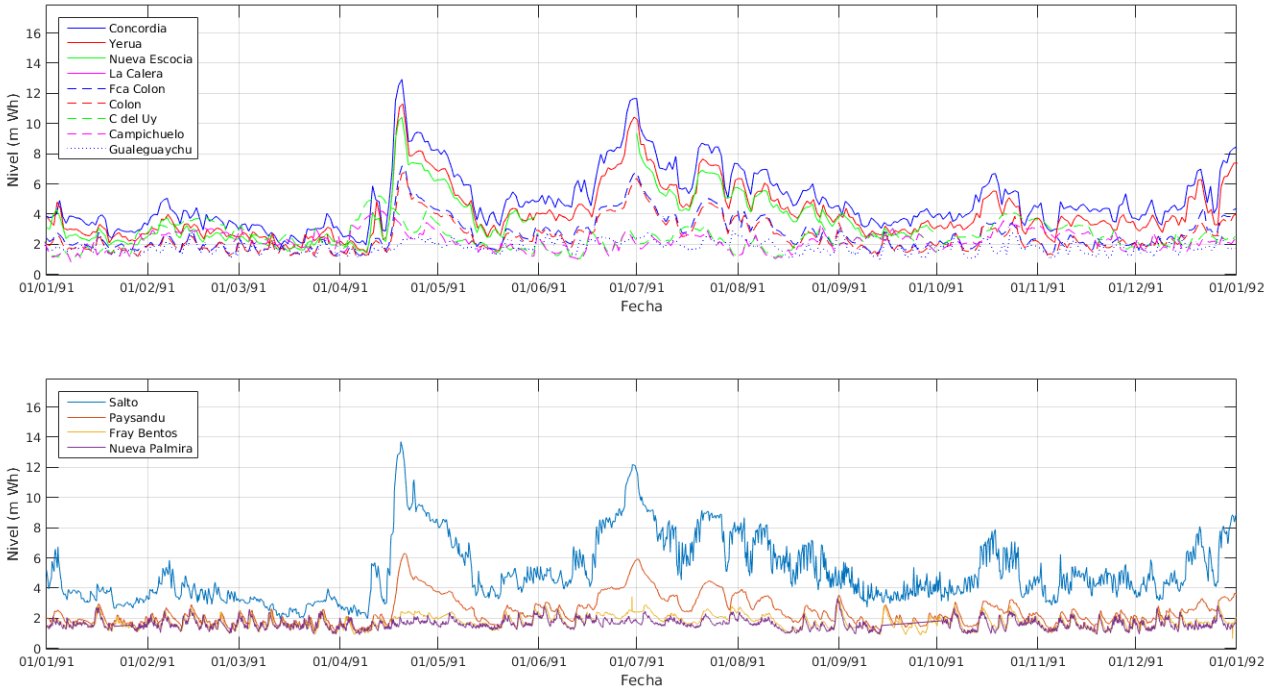


Figura 1.38: Misma margen - 1991.

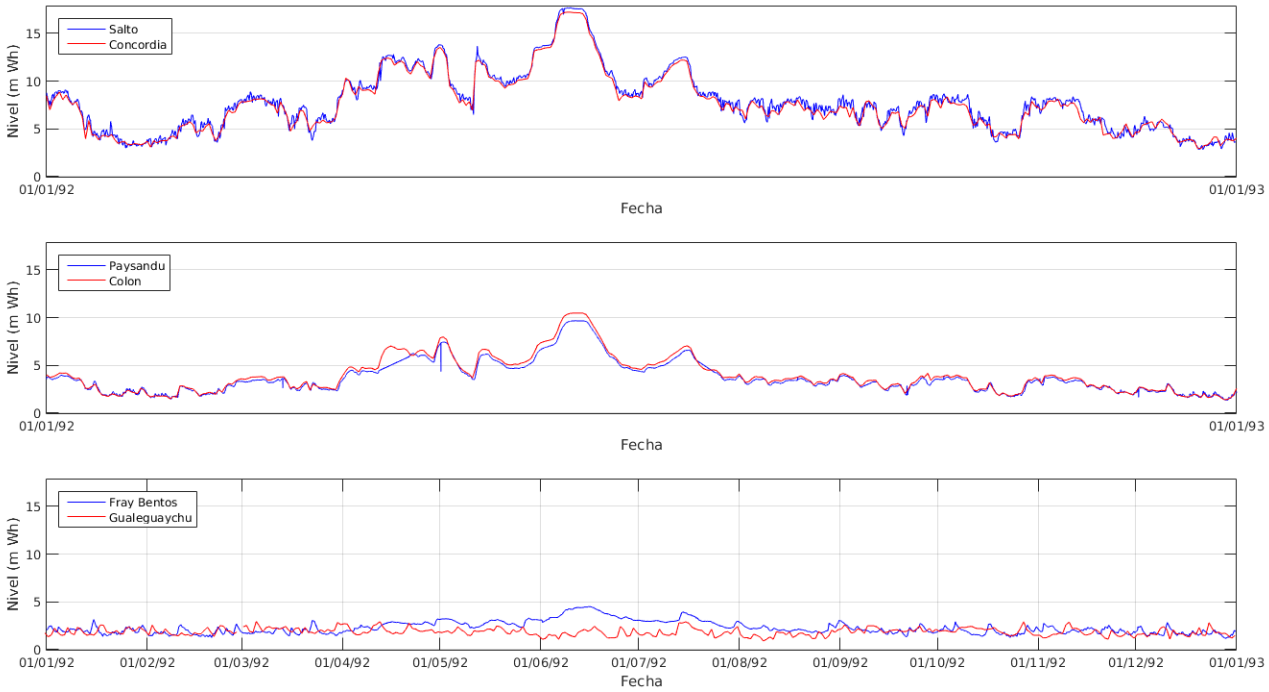


Figura 1.39: Márgenes opuestas - 1992.

Misma margen

No se cuenta con datos para la estación de La Calera, Nueva Escocia presenta vacíos en enero, octubre, noviembre y diciembre. El comportamiento de los registros en Concepción del Uruguay, Campichuelo y Gualeguaychú no se condice con la evolución temporal en las demás estaciones, por lo cual se entiende que éstos son erróneos. Las restantes estaciones presentan un comportamiento consistente entre sí y no se observan anomalías.

1.4.14. 1993

Márgenes opuestas

Se cuenta con datos para todas las estaciones. Las estaciones en márgenes opuestas presentan un comportamiento similar en términos de su evolución temporal. Para el caso de Salto – Concordia, se tiene que la serie de Salto presenta algunas anomalías asociadas a registros puntuales que se encuentran por debajo de los valores esperables para la curva de evolución temporal (mes de mayo y mes de diciembre). A mediados del mes de junio se observa un alejamiento entre los registros de estas series. Se observa un cierto alejamiento que aumenta a medida que aumenta el nivel para el caso de Colón y Paysandú. Las distintas estaciones presentan un comportamiento consistente entre sí.

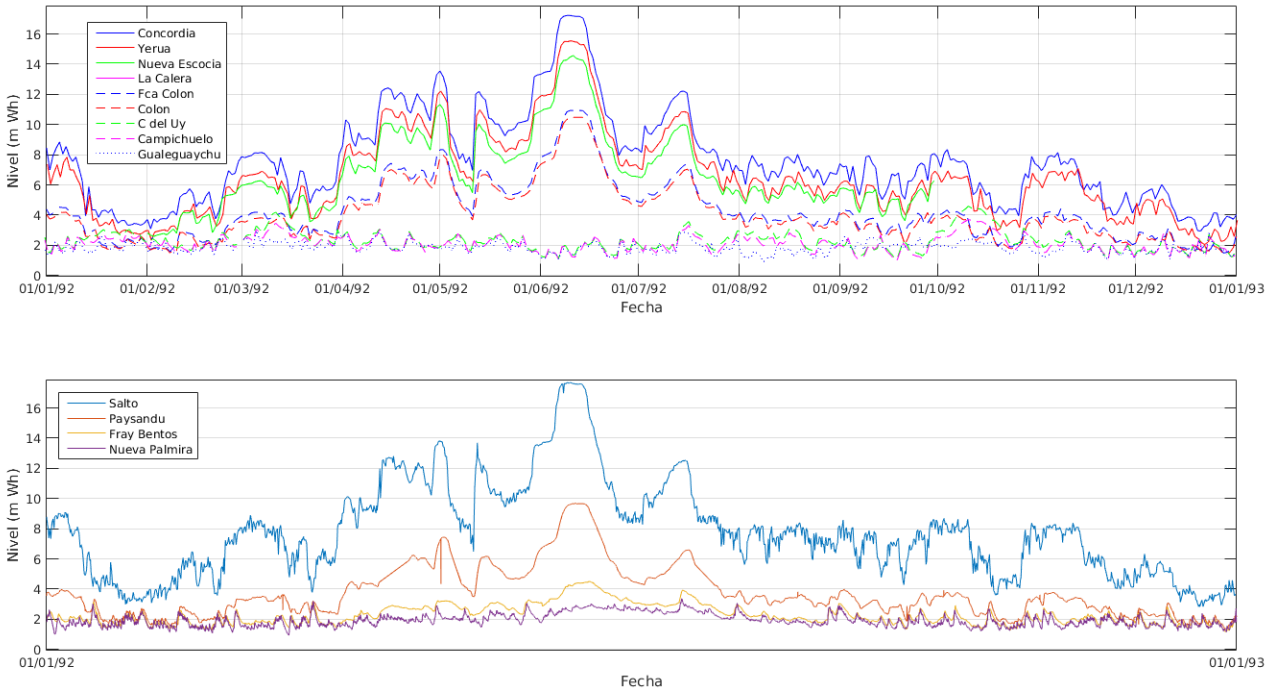


Figura 1.40: Misma margen - 1992.

Misma margen

No se cuenta con datos para La Calera, Nueva Escocia presenta vacíos en los meses de enero, febrero, marzo y agosto, Nueva Palmira presenta vacíos en el mes de setiembre. Las restantes estaciones presentan un comportamiento consistente entre sí y no se observan anomalías.

1.4.15. 1994

Márgenes opuestas

Se cuenta con datos para todas las estaciones. Las estaciones en márgenes opuestas presentan un comportamiento similar en términos de su evolución temporal. Se observa un cierto alejamiento que aumenta a medida que aumenta el nivel para el caso de Colón y Paysandú. Para el caso de Fray Bentos – Gualeguaychu se observa un alejamiento en los registros en el mes de mayo. Las distintas estaciones presentan un comportamiento consistente entre sí.

Misma margen

No se cuenta con datos de La Calera, Yeruá presenta vacíos en los meses de noviembre y diciembre. Las restantes estaciones presentan un comportamiento consistente entre sí y no se observan anomalías.

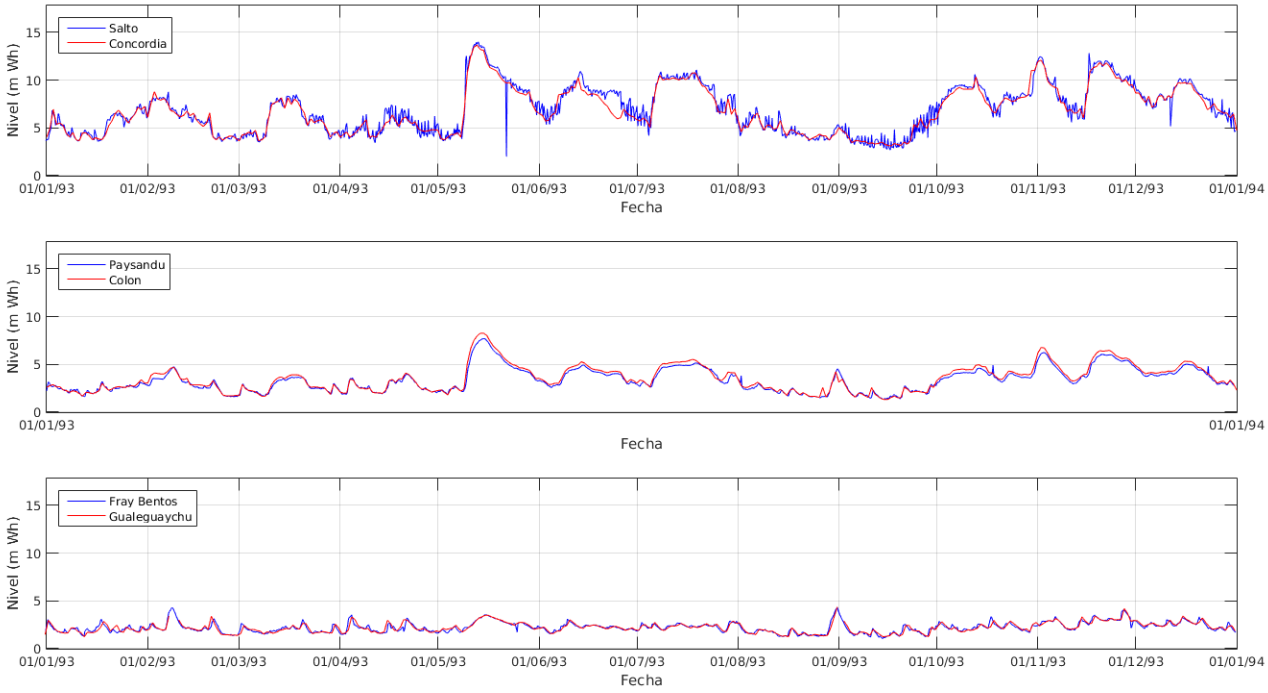


Figura 1.41: Márgenes opuestas - 1993.

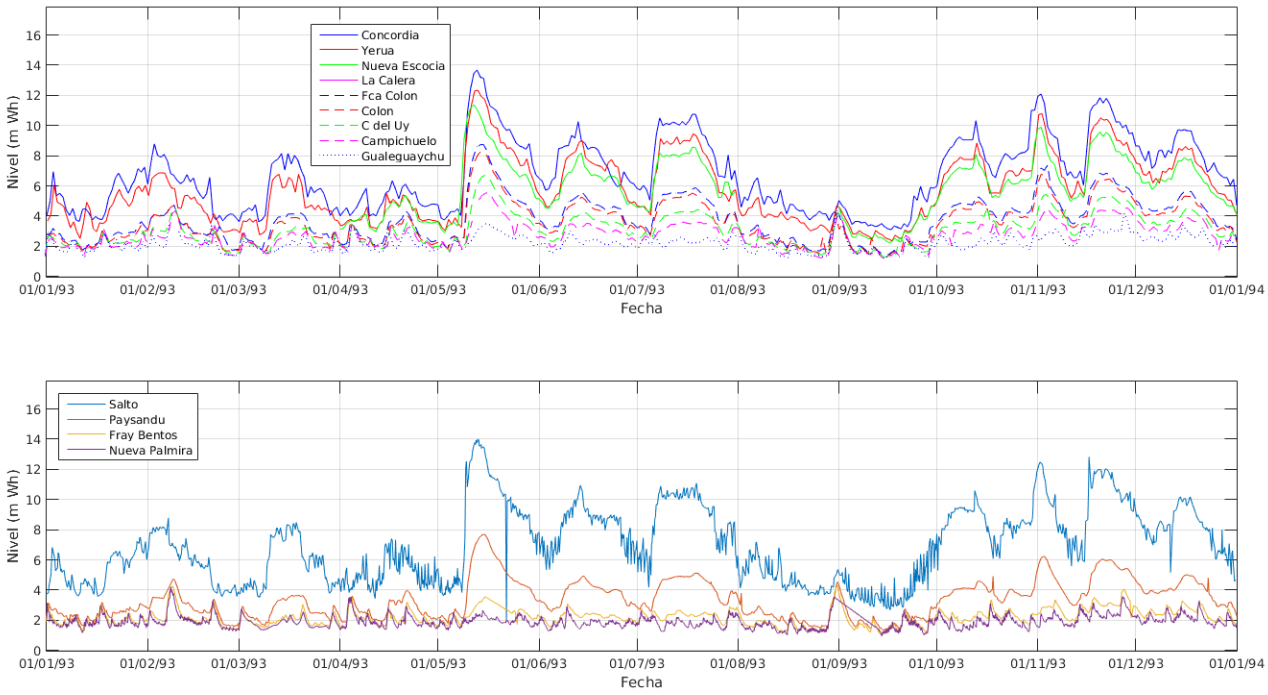


Figura 1.42: Misma margen - 1993.

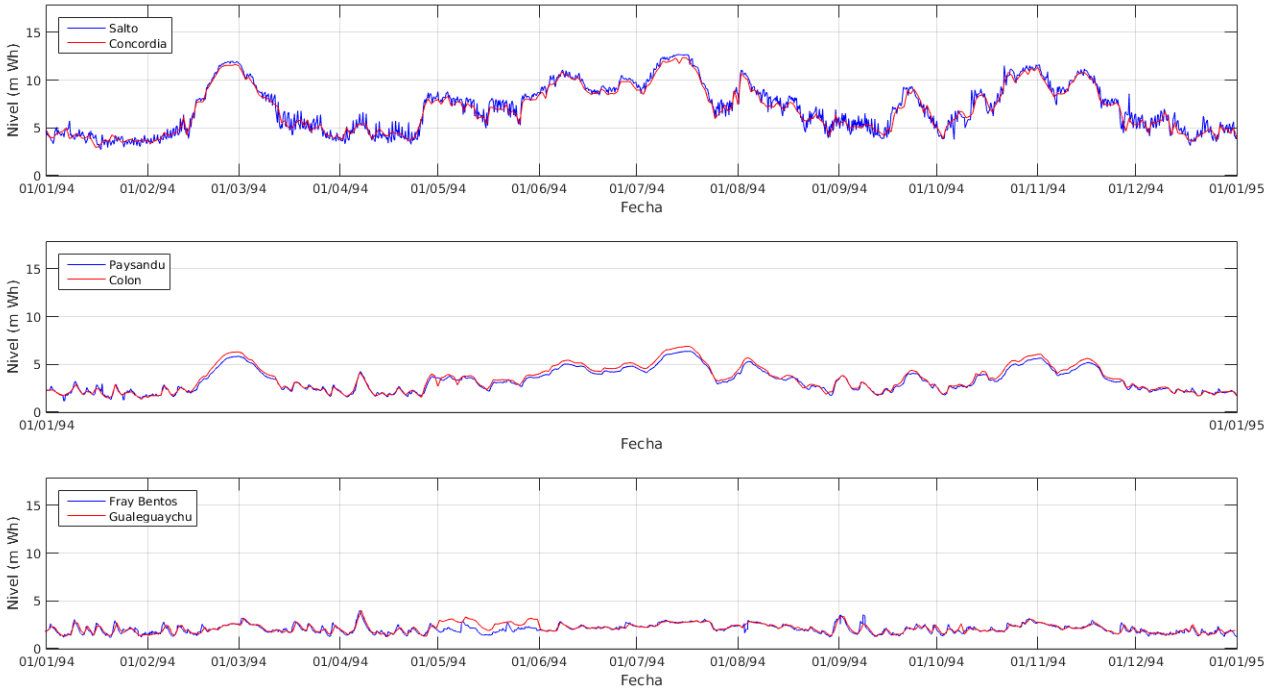


Figura 1.43: Márgenes opuestas - 1994.

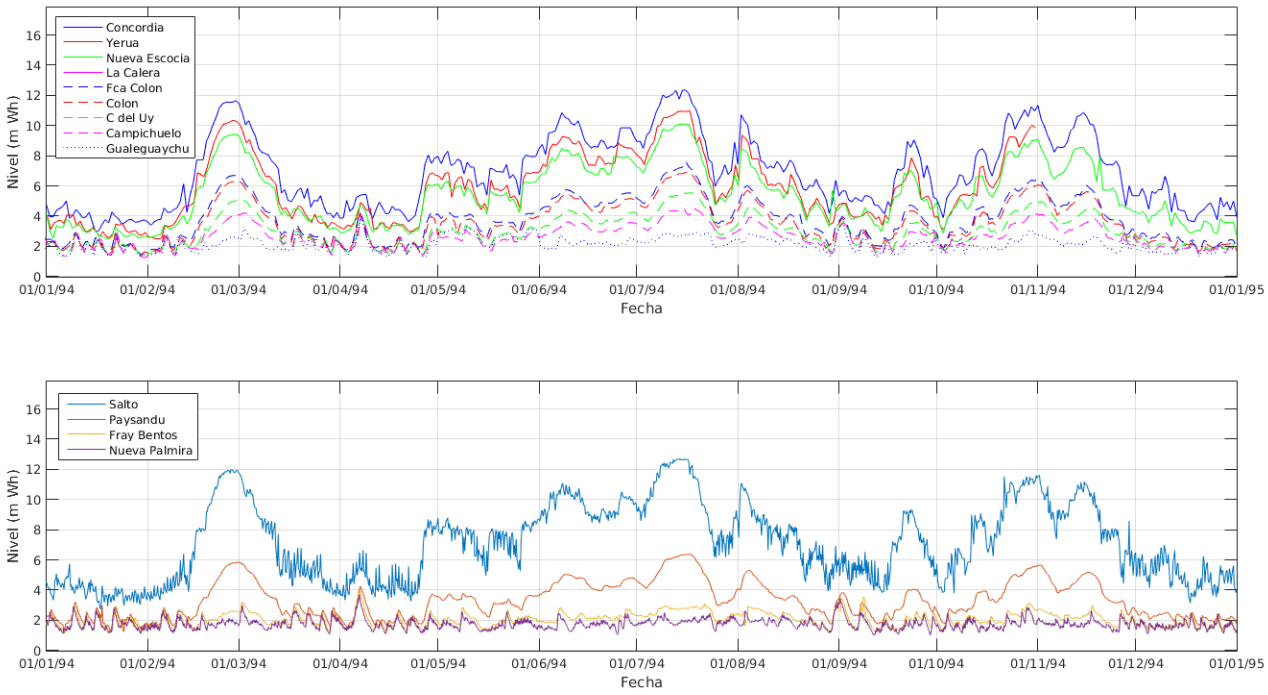


Figura 1.44: Misma margen - 1994.

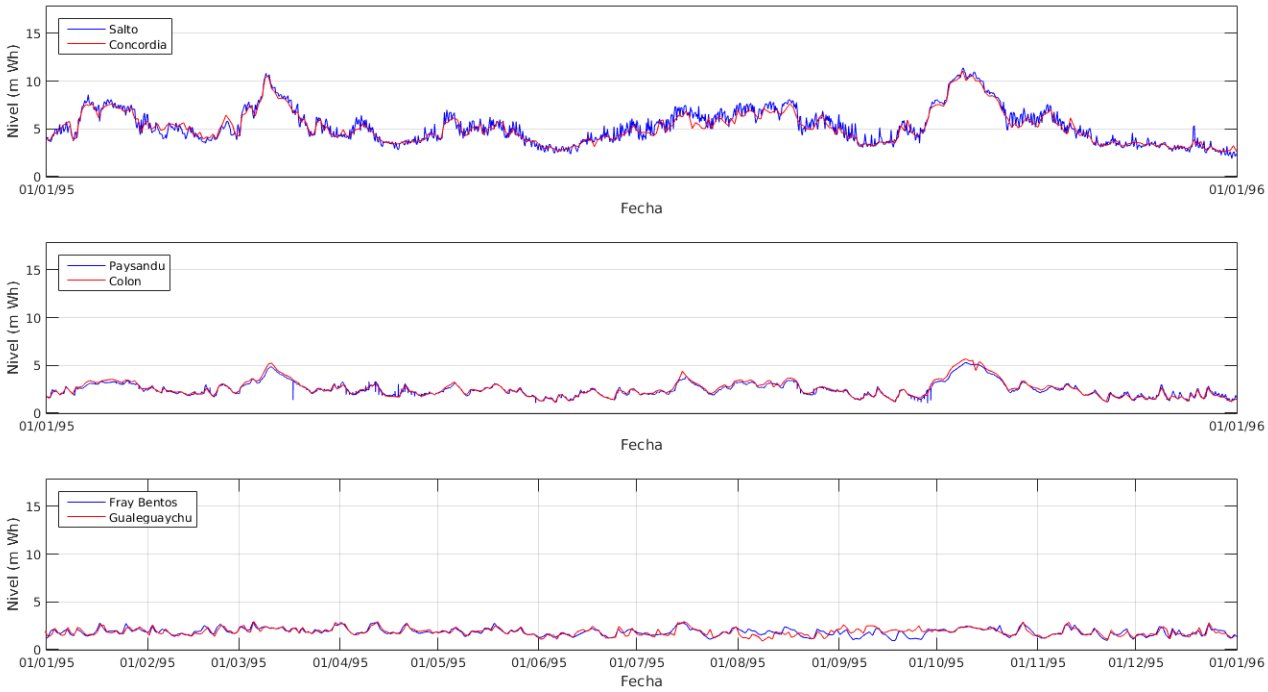


Figura 1.45: Márgenes opuestas - 1995.

1.4.16. 1995

Márgenes opuestas

Se cuenta con datos para todas las estaciones. Las estaciones en márgenes opuestas presentan un comportamiento similar en términos de su evolución temporal. Se observa un cierto alejamiento que aumenta a medida que aumenta el nivel para el caso de Colón y Paysandú. Se observan algunas anomalías en la serie de Paysandú, con valores puntuales por debajo o por encima del valor esperable de la curva de evolución temporal. Para el caso de Fray Bentos – Gualeguaychú, se observa un cierto alejamiento en los meses de agosto y setiembre. Las distintas estaciones presentan un comportamiento consistente entre sí.

Misma margen

Nueva Escocia presenta vacíos en los meses de abril y junio, La Calera en los meses de enero y febrero, mientras que Nueva Palmira lo hace en los meses de octubre, noviembre y diciembre. Las restantes estaciones presentan un comportamiento consistente entre sí y no se observan anomalías.

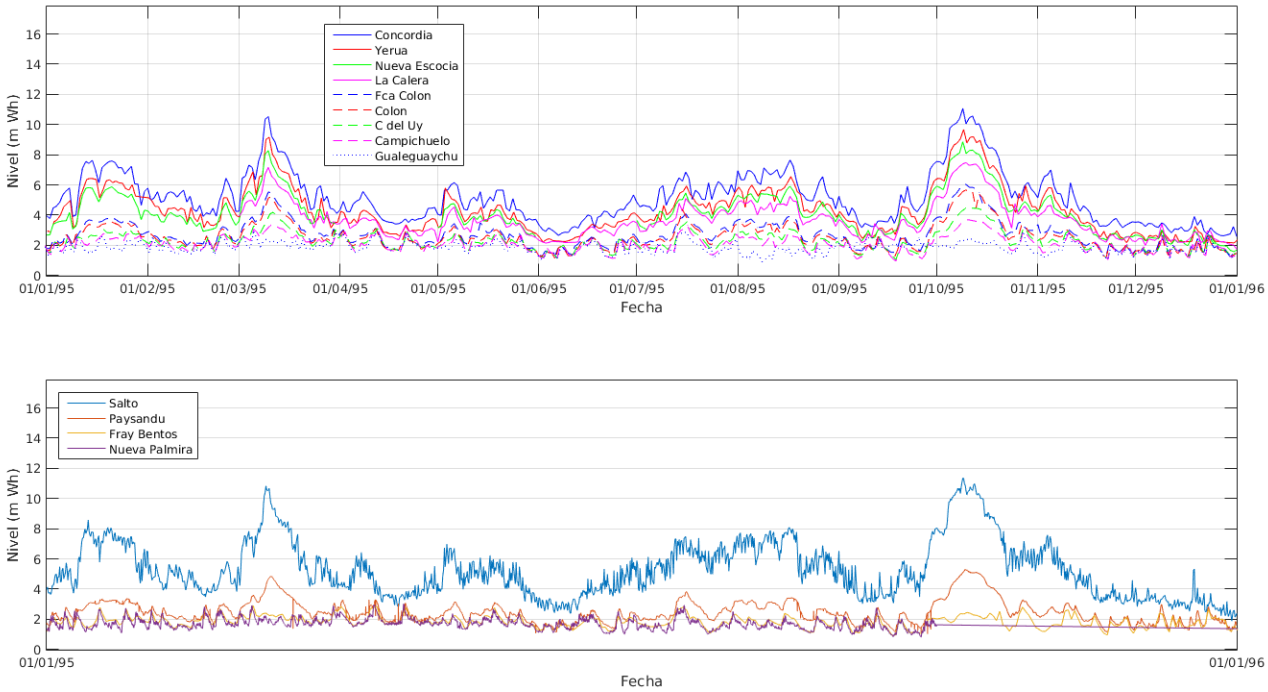


Figura 1.46: Misma margen - 1995.

1.4.17. 1996

Márgenes opuestas

Se cuenta con datos para todas las estaciones, excepto para Fray Bentos en el mes de marzo. Las estaciones en márgenes opuestas presentan un comportamiento similar en términos de su evolución temporal. Se observa un cierto alejamiento que aumenta a medida que aumenta el nivel para el caso de Colón y Paysandú. Se observan algunas anomalías en la serie de Paysandú, con valores puntuales por debajo o por encima del valor esperable de la curva de evolución temporal. Las distintas estaciones presentan un comportamiento consistente entre sí.

Misma margen

Nueva Palmira presenta vacíos en los meses de abril a setiembre inclusive. Las restantes estaciones presentan un comportamiento consistente entre sí y no se observan anomalías.

1.4.18. 1997

Márgenes opuestas

Se cuenta con datos para todas las estaciones. Las estaciones en márgenes opuestas presentan un comportamiento similar en términos de su evolución temporal. Se observa un cierto alejamiento que aumenta a medida que aumenta el nivel para el caso de Colón y Paysandú. Se

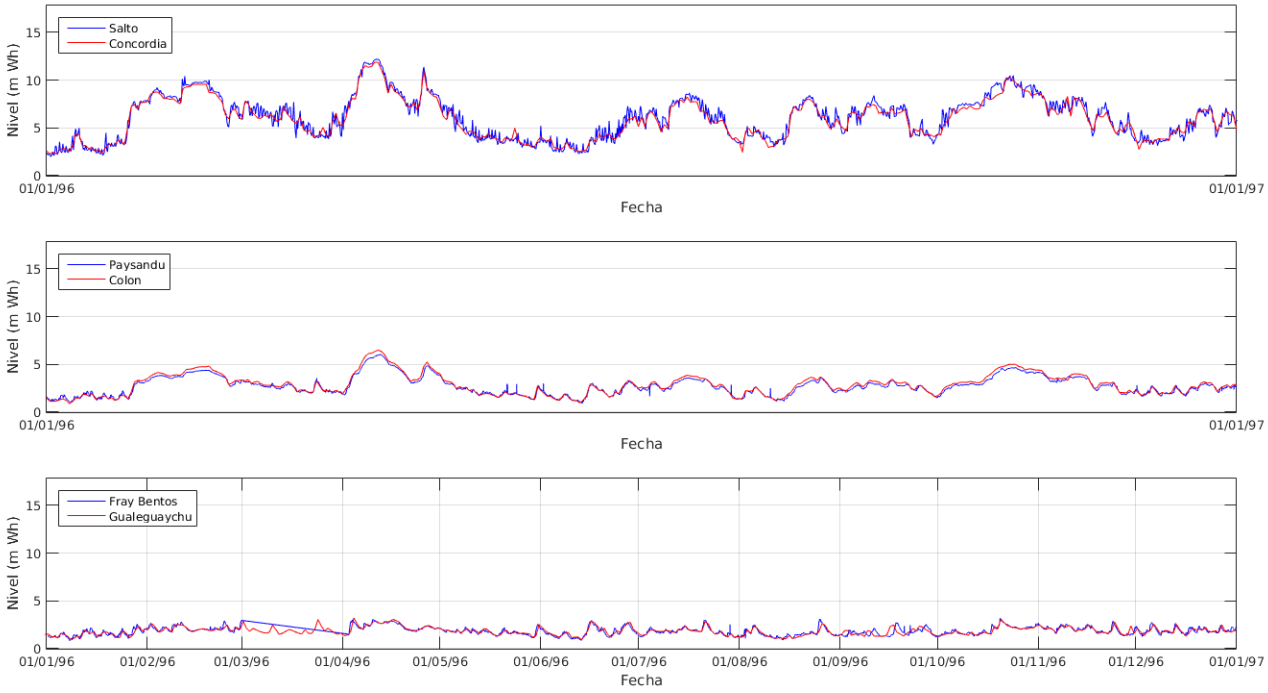


Figura 1.47: Márgenes opuestas - 1996.

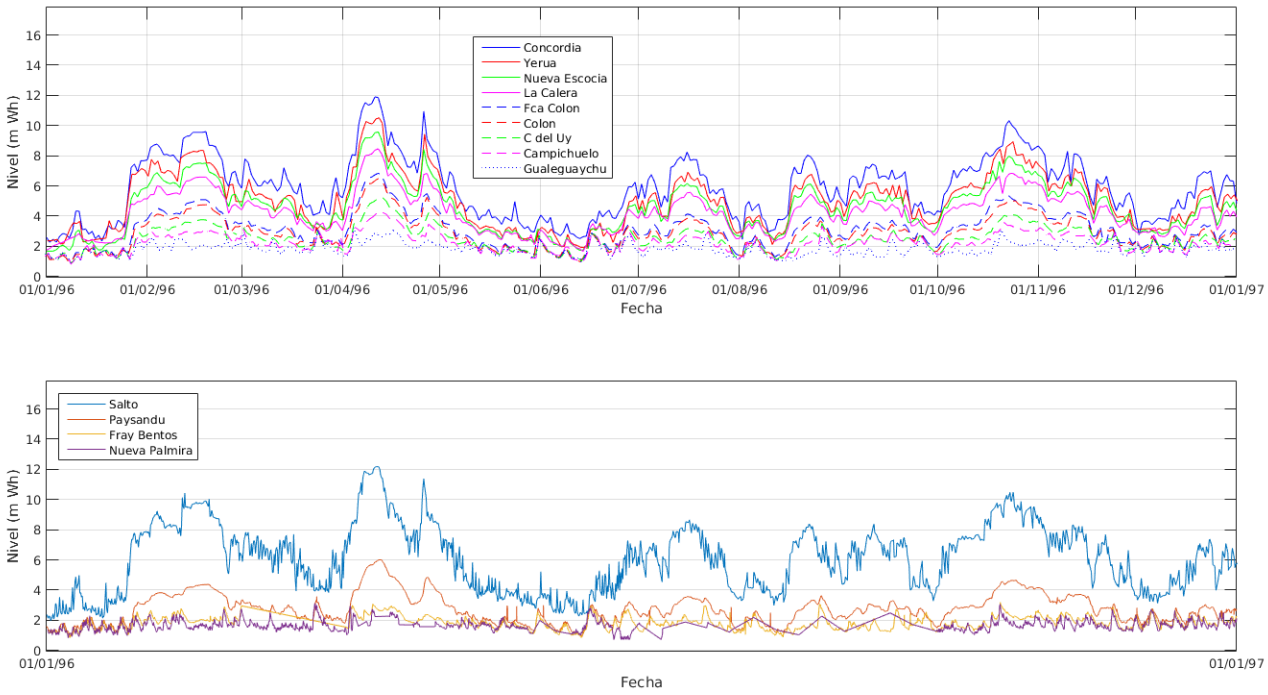


Figura 1.48: Misma margen - 1996.

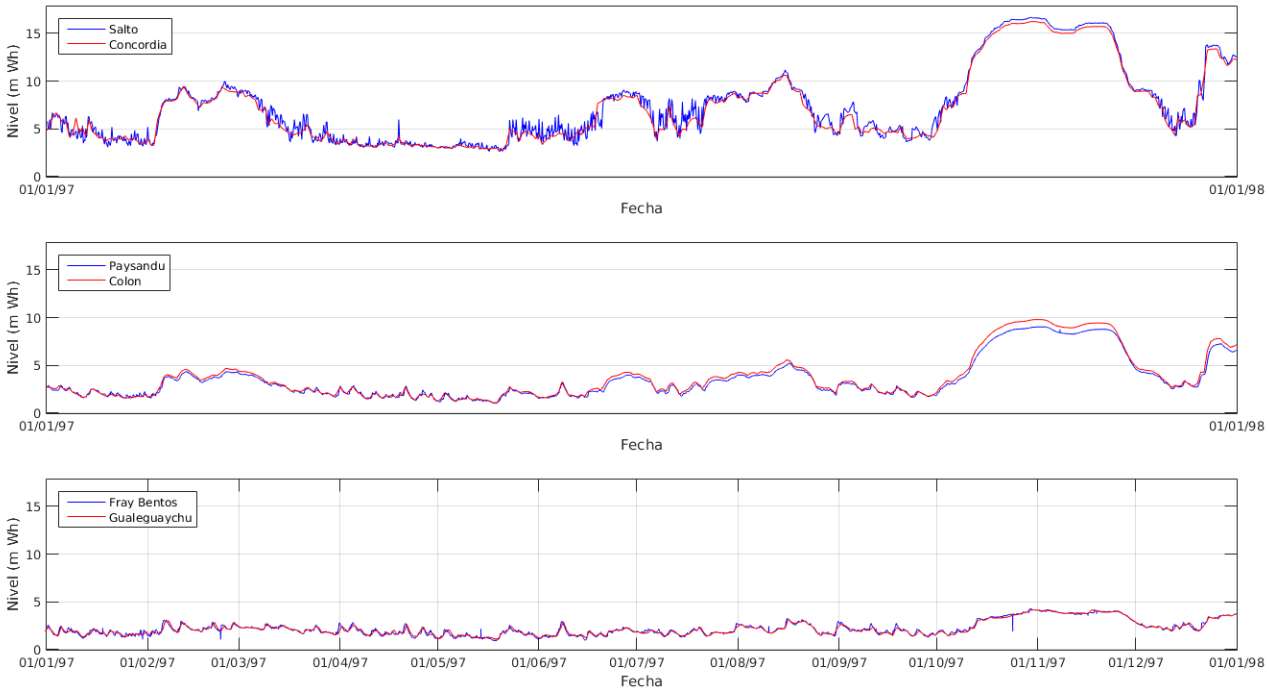


Figura 1.49: Márgenes opuestas - 1997.

observa un comportamiento similar para el caso de Salto – Concordia en registros de nivel mayores a los 15 m. La serie de Fray Bentos presenta un valor puntual por debajo de lo esperable para la curva de evolución temporal en el mes de octubre. Las distintas estaciones presentan un comportamiento consistente entre sí.

Misma margen

Fábrica Colón y Campichuelo presentan vacíos en el mes de noviembre. Las restantes estaciones presentan un comportamiento consistente entre sí y no se observan anomalías.

1.4.19. 1998

Márgenes opuestas

Se cuenta con datos para todas las estaciones. Las estaciones en márgenes opuestas presentan un comportamiento similar en términos de su evolución temporal. Se observa un cierto alejamiento que aumenta a medida que aumenta el nivel para el caso de Colón y Paysandú. Se observa un comportamiento similar para el caso de Salto – Concordia en registros de nivel mayores. Se registran algunas anomalías puntuales por encima o debajo de los valores esperables para la curva de evolución temporal tanto en Paysandú como en Fray Bentos. Las distintas estaciones presentan un comportamiento consistente entre sí.

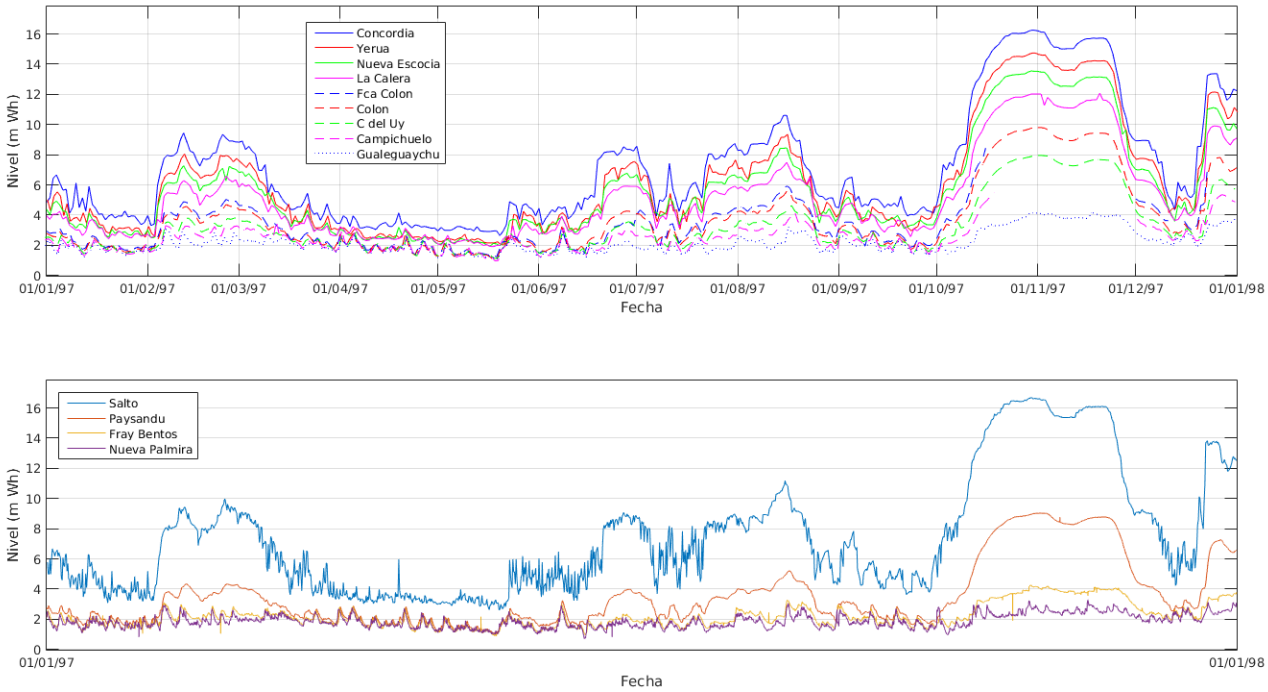


Figura 1.50: Misma margen - 1997.

Misma margen

Se cuenta con datos para todas las estaciones. En la serie de Nueva Palmira se ovserva un valor puntial en el mes de febrero inferior a lo esperado de acuerdo al comportamiento de la curva del registro. Las restantes estaciones presentan un comportamiento consistente entre sí y no se observan anomalías.

1.4.20. 1999

Márgenes opuestas

Se cuenta con datos para todas las estaciones, excepto para Paysandú en el mes de setiembre. Las estaciones en márgenes opuestas presentan un comportamiento similar en términos de su evolución temporal. Se observa un cierto alejamiento que aumenta a medida que aumenta el nivel para el caso de Colón y Paysandú. Se constatan algunas anomalías en la serie correspondiente a Fray Bentos en los meses de setiembre y octubre, presentando valores puntuales por debajo de lo esperable para la curva de evolución temporal. Las distintas estaciones presentan un comportamiento consistente entre sí.

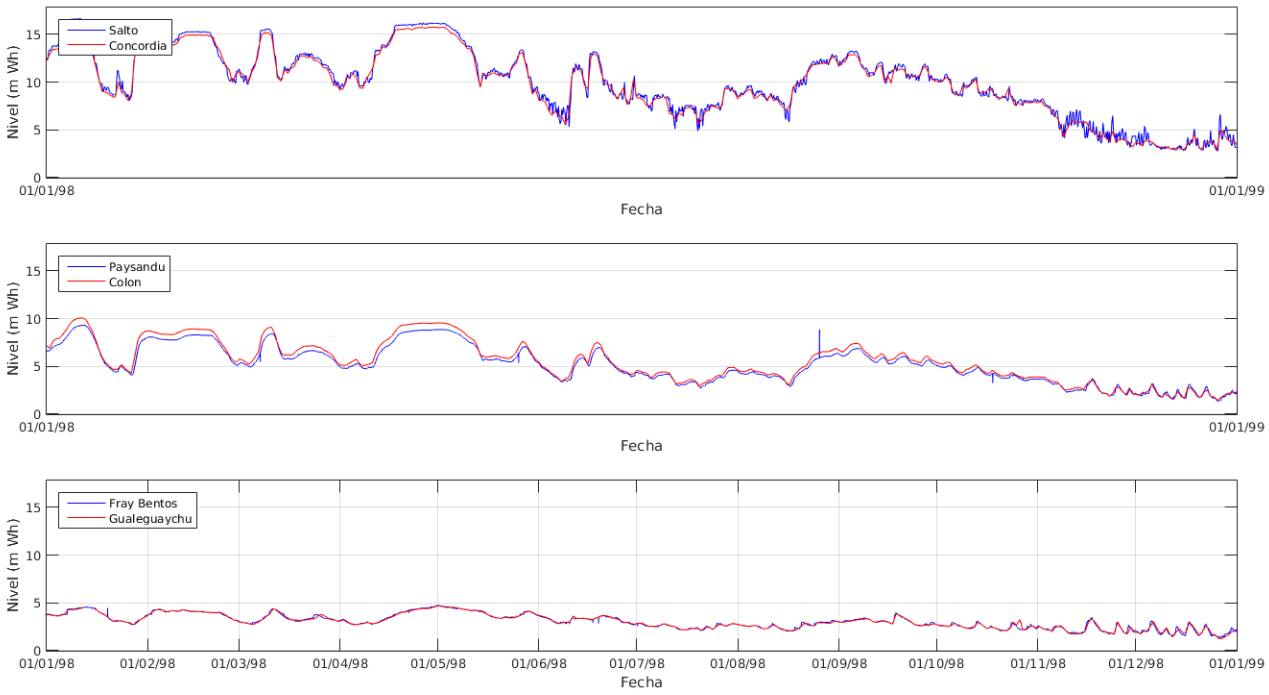


Figura 1.51: Márgenes opuestas - 1998.

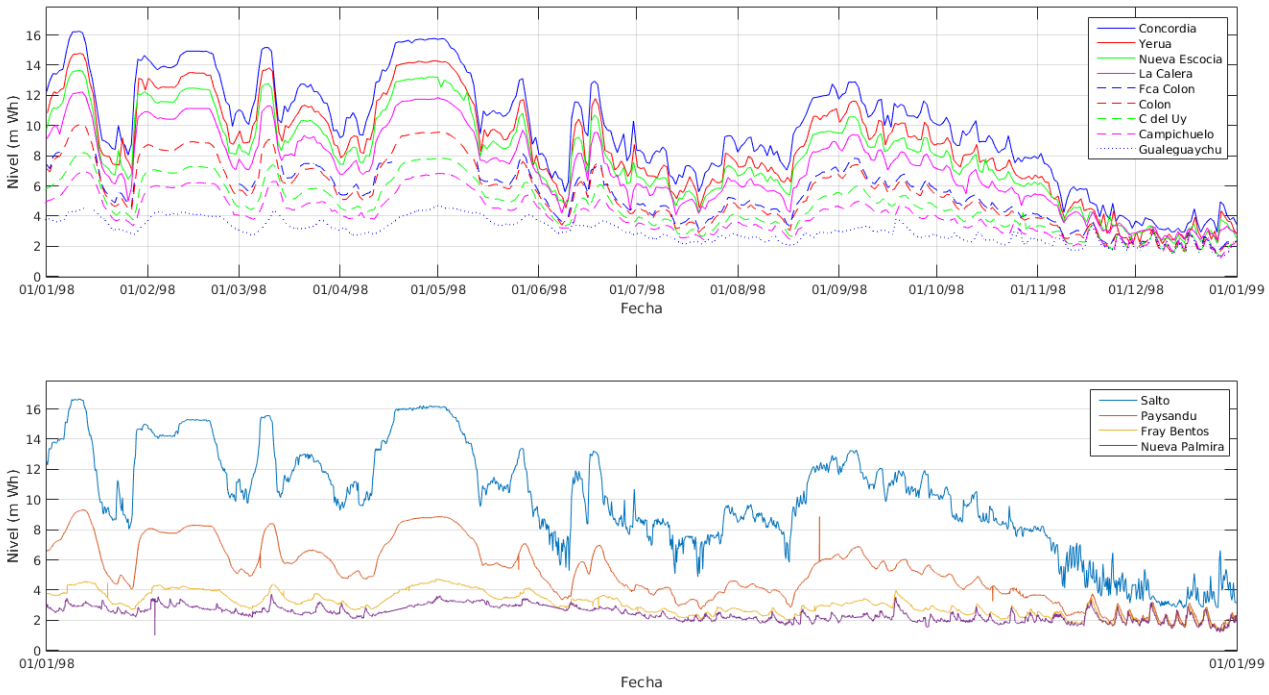


Figura 1.52: Misma margen - 1998.

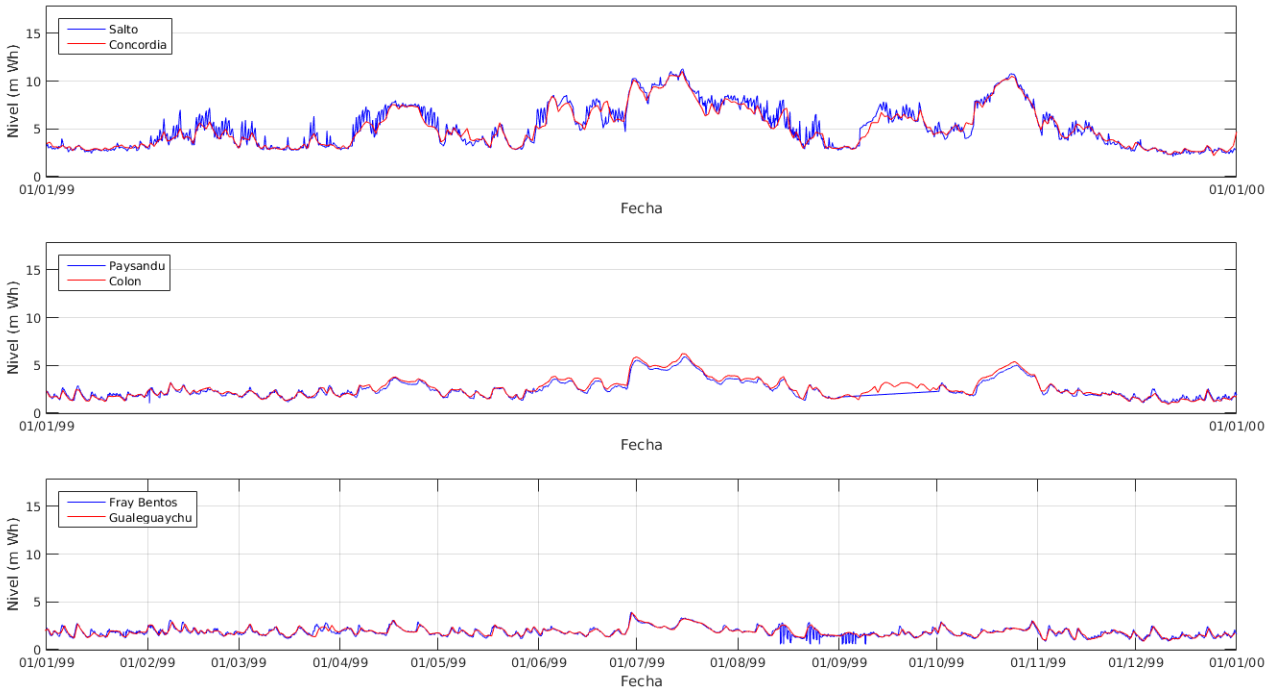


Figura 1.53: Márgenes opuestas - 1999.

Misma margen

Se observa una anomalía en La Calera a partir de finales de noviembre, donde el valor del registro se mantiene constante, por lo cual se entiende que es erróneo. Las restantes estaciones presentan un comportamiento consistente entre sí y no se observan anomalías.

1.4.21. 2000

Márgenes opuestas

Se cuenta con datos para todas las estaciones, excepto para Paysandú hasta el mes de julio inclusive. Las estaciones en márgenes opuestas presentan un comportamiento similar en términos de su evolución temporal. Se observa un cierto alejamiento que aumenta a medida que aumenta el nivel para el caso de Colón y Paysandú. Las distintas estaciones presentan un comportamiento consistente entre sí.

Misma margen

Nueva Escocia presenta vacíos de marzo a mayo, Fábrica Colón de enero a marzo, Campichuelo de junio a julio y Nueva Palmira de octubre a diciembre. Se observan anomalías en La Calera asociadas a niveles menores a 2 m. Las restantes estaciones presentan un comportamiento consistente entre sí y no se observan anomalías.

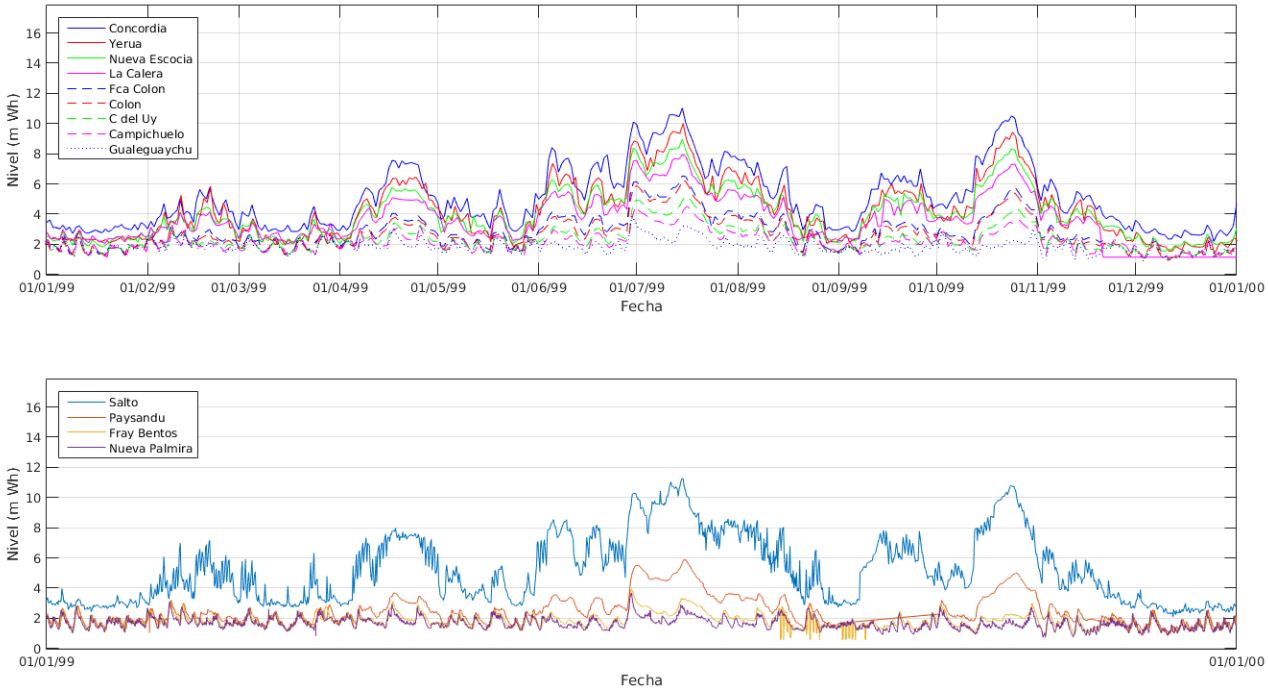


Figura 1.54: Misma margen - 1999.

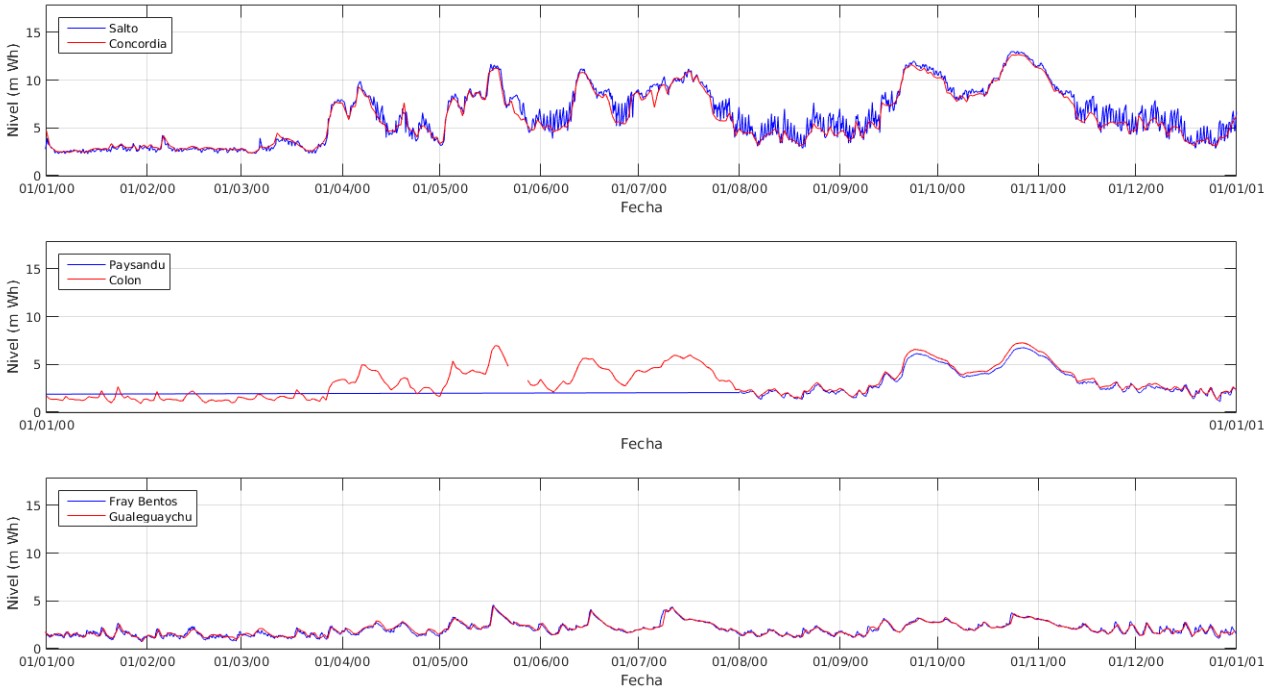


Figura 1.55: Márgenes opuestas - 2000.

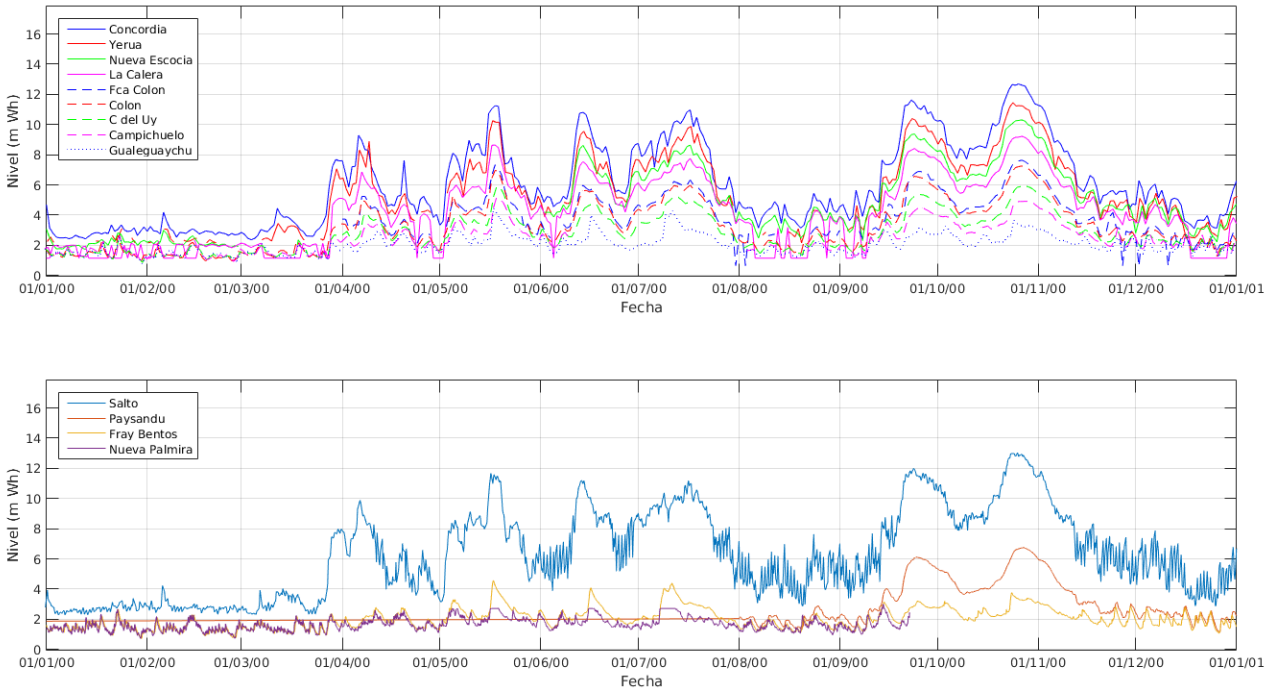


Figura 1.56: Misma margen - 2000.

1.4.22. 2001

Márgenes opuestas

Se cuenta con datos para todas las estaciones. Las estaciones en márgenes opuestas presentan un comportamiento similar en términos de su evolución temporal. Se observa un cierto alejamiento que aumenta a medida que aumenta el nivel para el caso de Colón y Paysandú. Se constatan algunas anomalías para la serie de Paysandú asociadas a valores puntuales por encima o debajo del valor esperable de la curva de evolución temporal. Las distintas estaciones presentan un comportamiento consistente entre sí.

Misma margen

No se cuentan con datos para Nueva Palmira, Fábrica Colón presenta un vacío en el mes de diciembre. Las restantes estaciones presentan un comportamiento consistente entre sí y no se observan anomalías.

1.4.23. 2002

Márgenes opuestas

Se cuenta con datos para todas las estaciones. Las estaciones en márgenes opuestas presentan un comportamiento similar en términos de su evolución temporal. Se observa un cierto aleja-

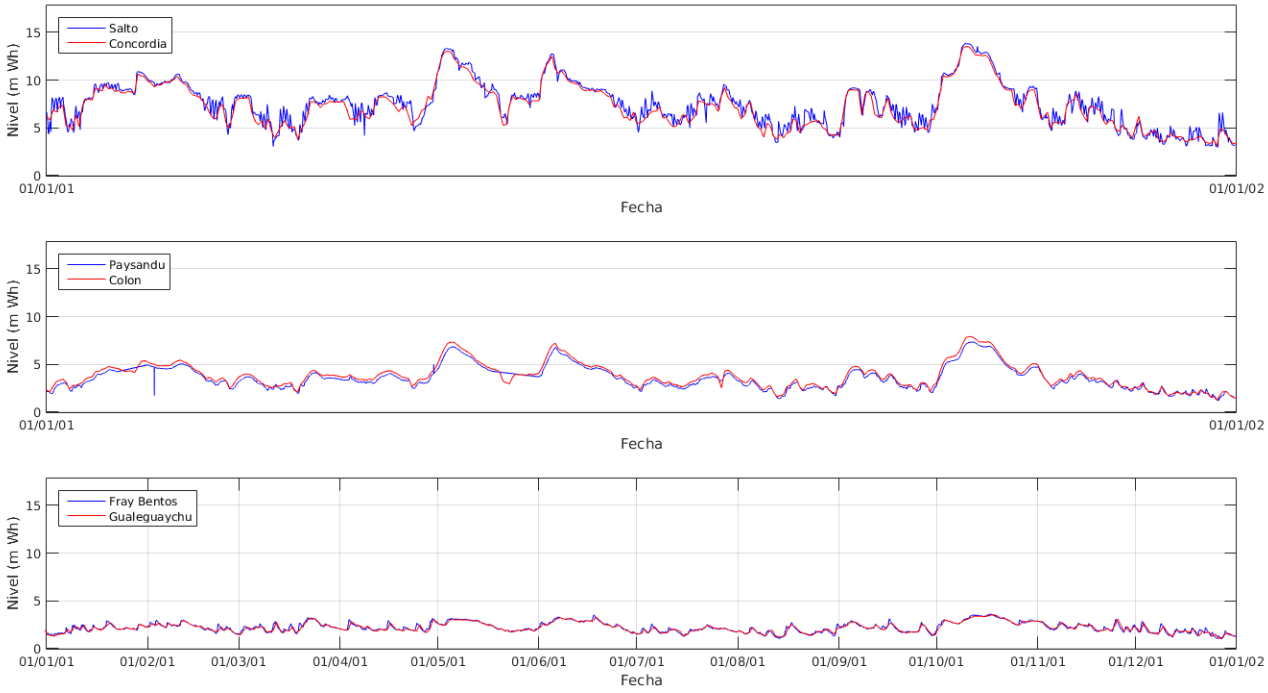


Figura 1.57: Márgenes opuestas - 2001.

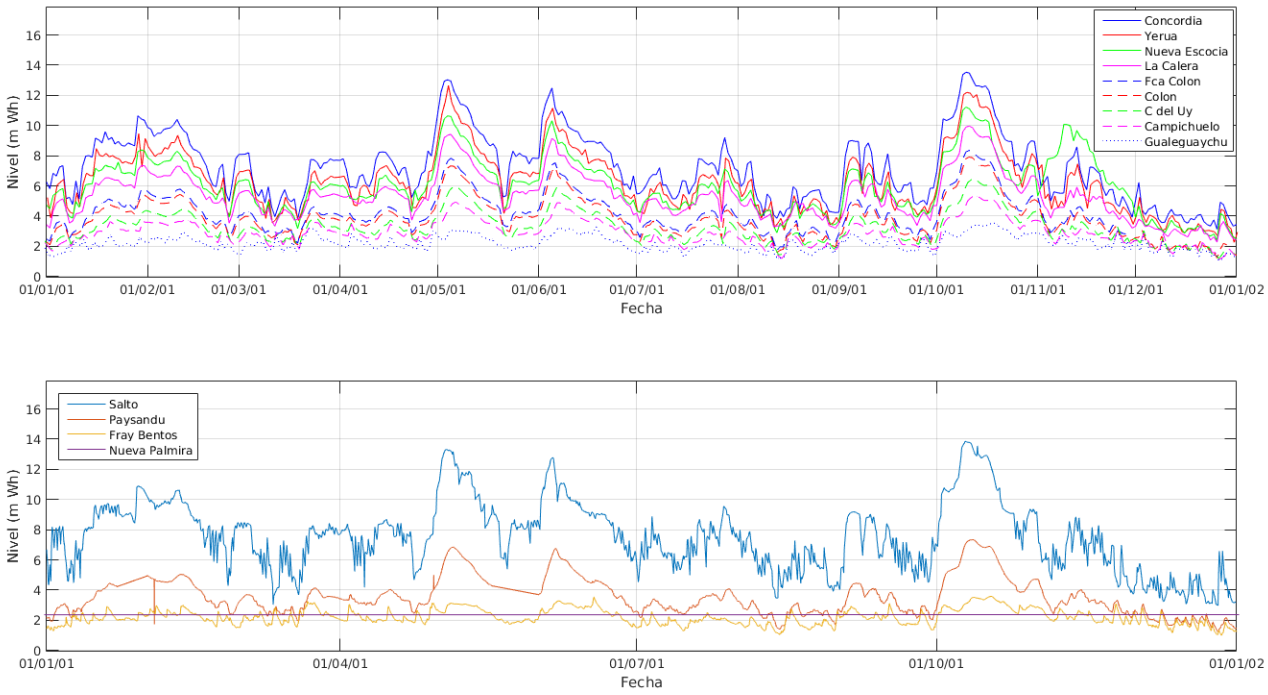


Figura 1.58: Misma margen - 2001.

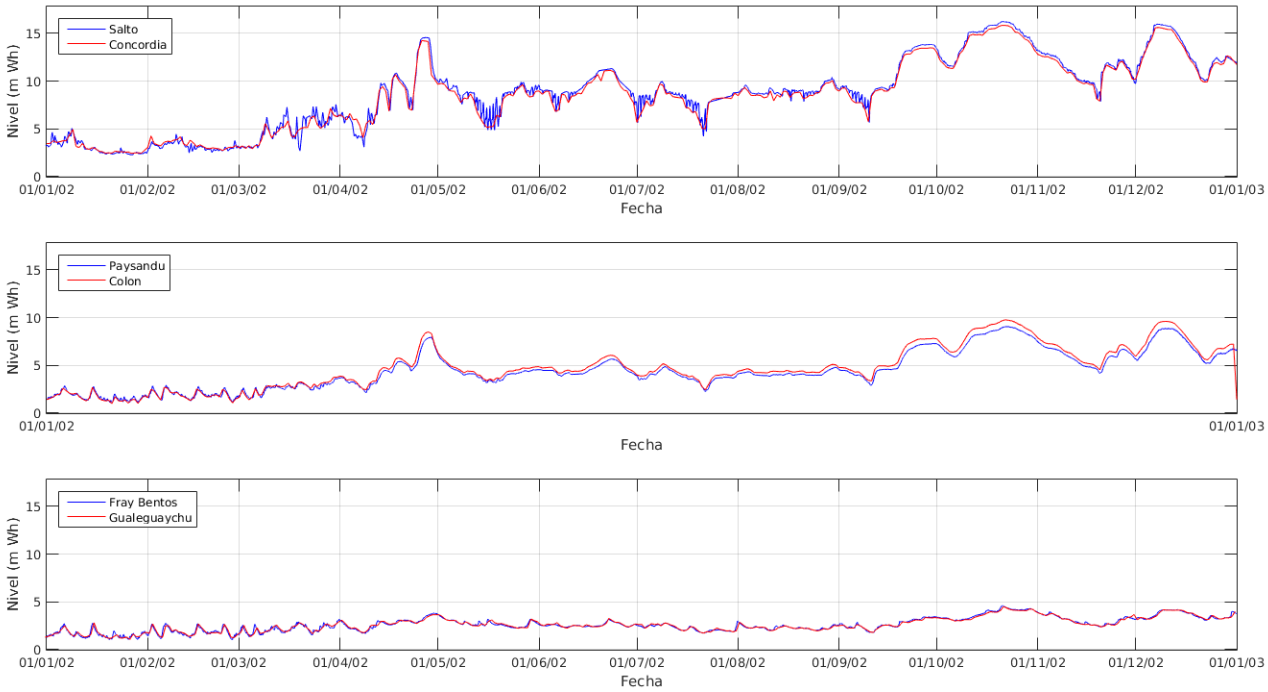


Figura 1.59: Márgenes opuestas - 2002.

miento que aumenta a medida que aumenta el nivel para el caso de Colón y Paysandú al igual que para Salto y Concordia. Las distintas estaciones presentan un comportamiento consistente entre sí.

Misma margen

Fábrica Colón presenta un vacío en el mes de enero, mientras que Nueva Palmira lo presenta en desde enero a mediados de mayo. La Calera presenta anomalías a partir de finales de noviembre, asociadas a registros de nivel más bajos de lo esperable, por lo que se asume que son erróneos. Las restantes estaciones presentan un comportamiento consistente entre sí y no se observan anomalías.

1.4.24. 2003

Márgenes opuestas

Se cuenta con datos para todas las estaciones excepto para Salto en los meses de julio a octubre inclusive. La serie de Fray Bentos presenta también algunos vacíos de datos en los meses de marzo, abril y mayo. Las estaciones en márgenes opuestas presentan un comportamiento similar en términos de su evolución temporal, excepto para el caso de Paysandú y Colón, donde no se tiene una correspondencia entre el comportamiento de las dos series. En función de la relación de estas series con las demás, se entiende que la de Paysandú es la que se ajusta mejor

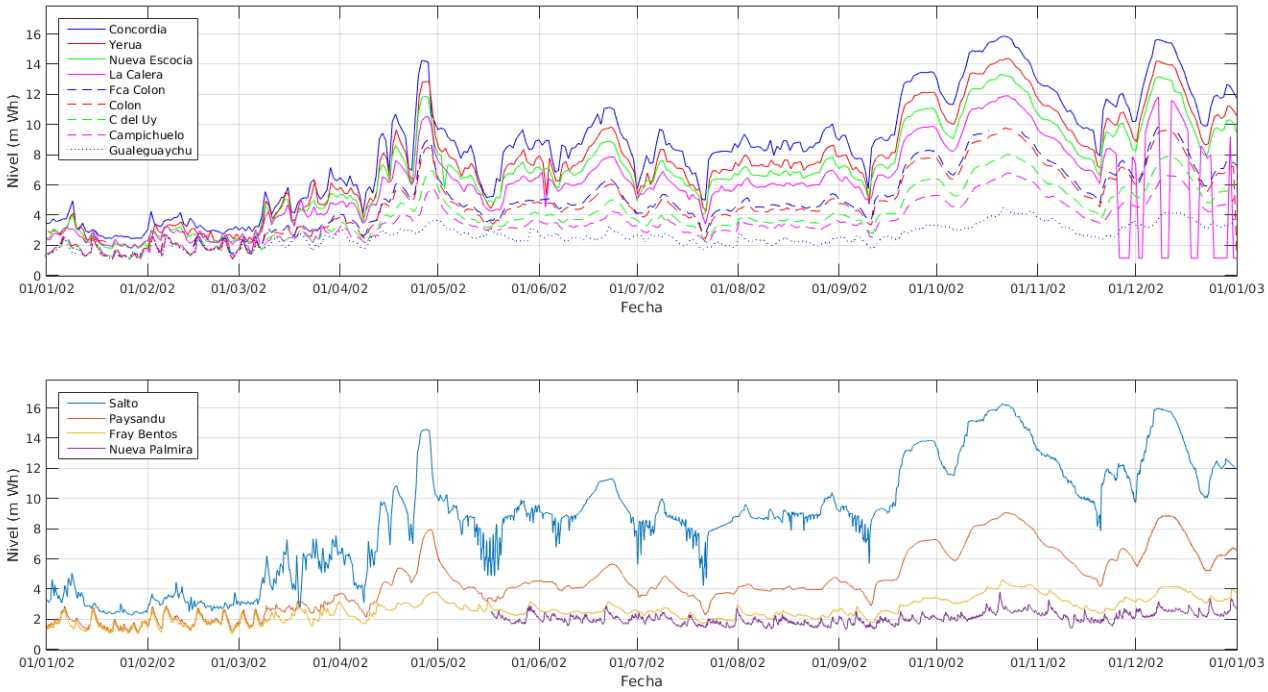


Figura 1.60: Misma margen - 2002.

al comportamiento global de los niveles para el año en cuestión, mientras que la de Colón es errónea. Las distintas estaciones presentan un comportamiento consistente entre sí, excepto Colón.

Misma margen

La Calera presenta algunas anomalías asociadas a valores de nivel inferiores a 2 m. Se corrobora además que el comportamiento de los registros de Colón es erróneo. Las restantes estaciones presentan un comportamiento consistente entre sí y no se observan anomalías.

1.4.25. 2004

Márgenes opuestas

Se cuenta con datos para todas las estaciones excepto para Paysandú en los meses de julio a diciembre. La serie de Fray Bentos presenta un vacío de datos a principios del mes de julio. Las estaciones en márgenes opuestas presentan un comportamiento similar en términos de su evolución temporal. Las distintas estaciones presentan un comportamiento consistente entre sí.

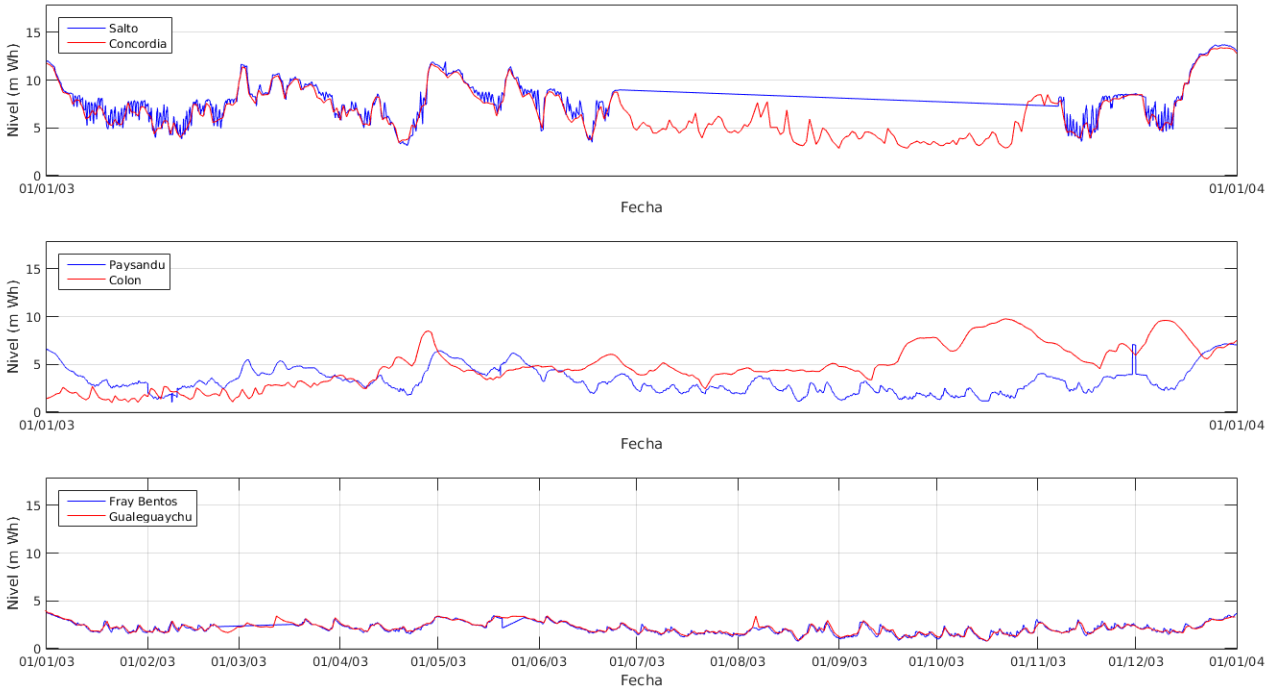


Figura 1.61: Márgenes opuestas - 2003.

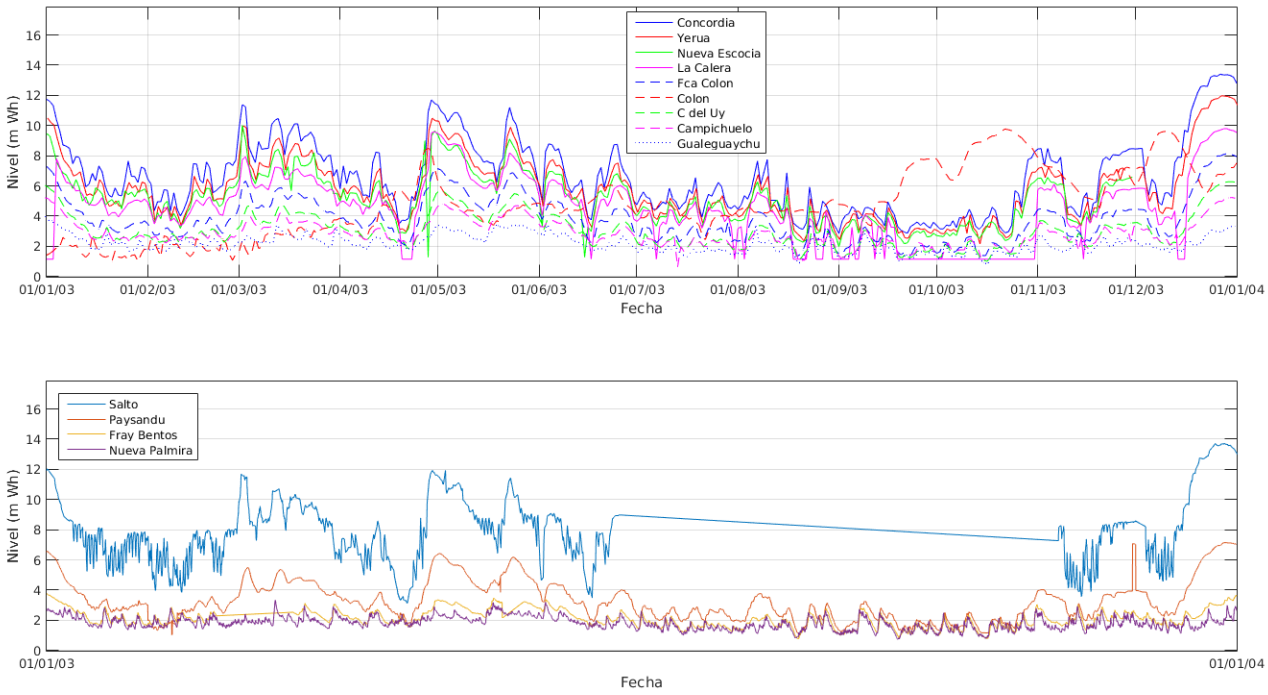


Figura 1.62: Misma margen - 2003.

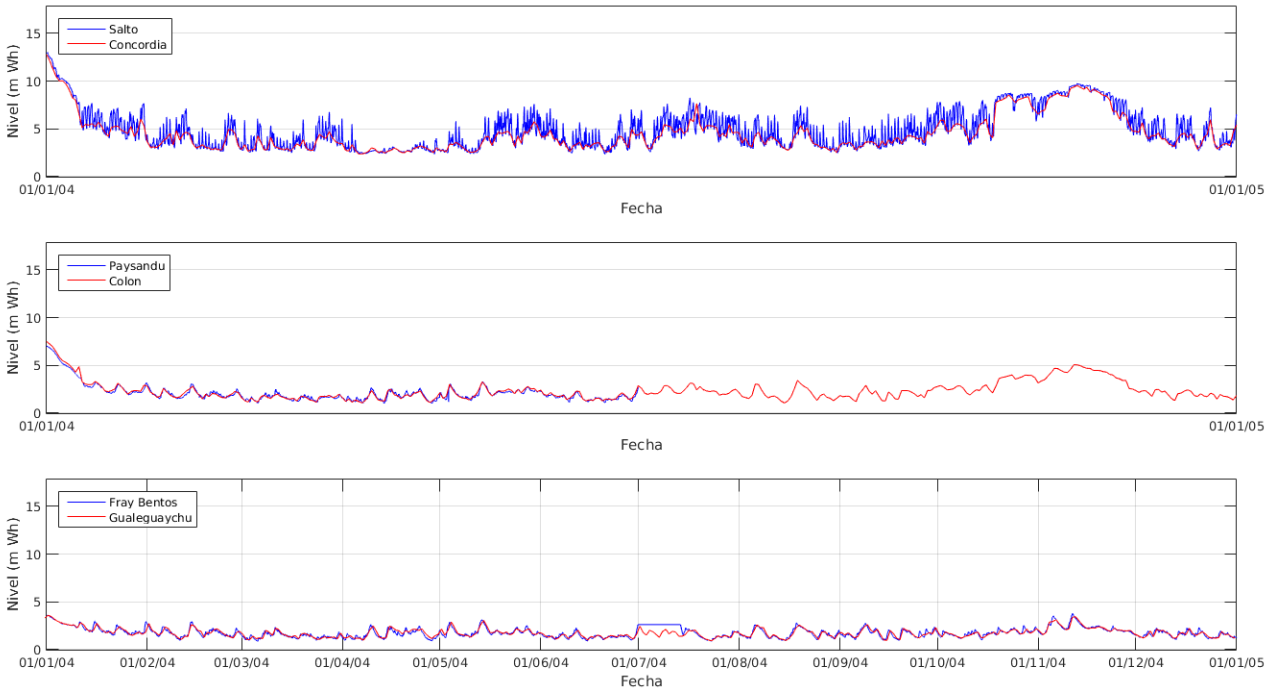


Figura 1.63: Márgenes opuestas - 2004.

Misma margen

Nueva Escocia presenta un vacío en el mes de julio. La Calera presenta algunas anomalías asociadas a valores de nivel inferiores a 2 m, para los meses de enero y febrero. Nueva Escocia presenta una anomalía en el mes de abril asociada a un valor de nivel mayor a lo esperado según la evolución temporal del registro y su relación con las demás estaciones. Las restantes estaciones presentan un comportamiento consistente entre sí y no se observan anomalías.

1.4.26. 2005

Márgenes opuestas

Se cuenta con datos para todas las estaciones, excepto Salto en los meses de abril, mayo y principios de junio y Paysandú en los meses de enero hasta julio inclusive, presentando además un vació a finales de noviembre y principios de diciembre. Las estaciones en márgenes opuestas presentan un comportamiento similar en términos de su evolución temporal. Se observa un cierto alejamiento que aumenta a medida que aumenta el nivel para el caso de Colón y Paysandú. Las distintas estaciones presentan un comportamiento consistente entre sí.

Misma margen

Las estaciones presentan un comportamiento consistente entre sí y no se observan anomalías.

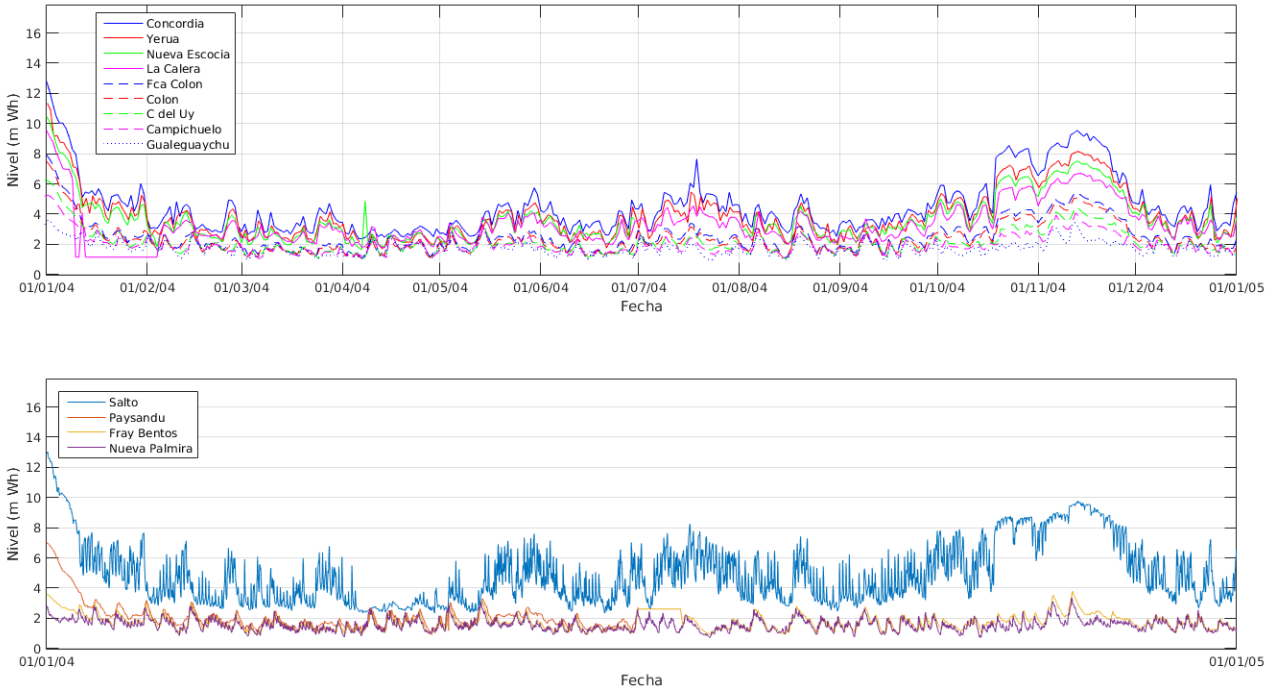


Figura 1.64: Misma margen - 2004.

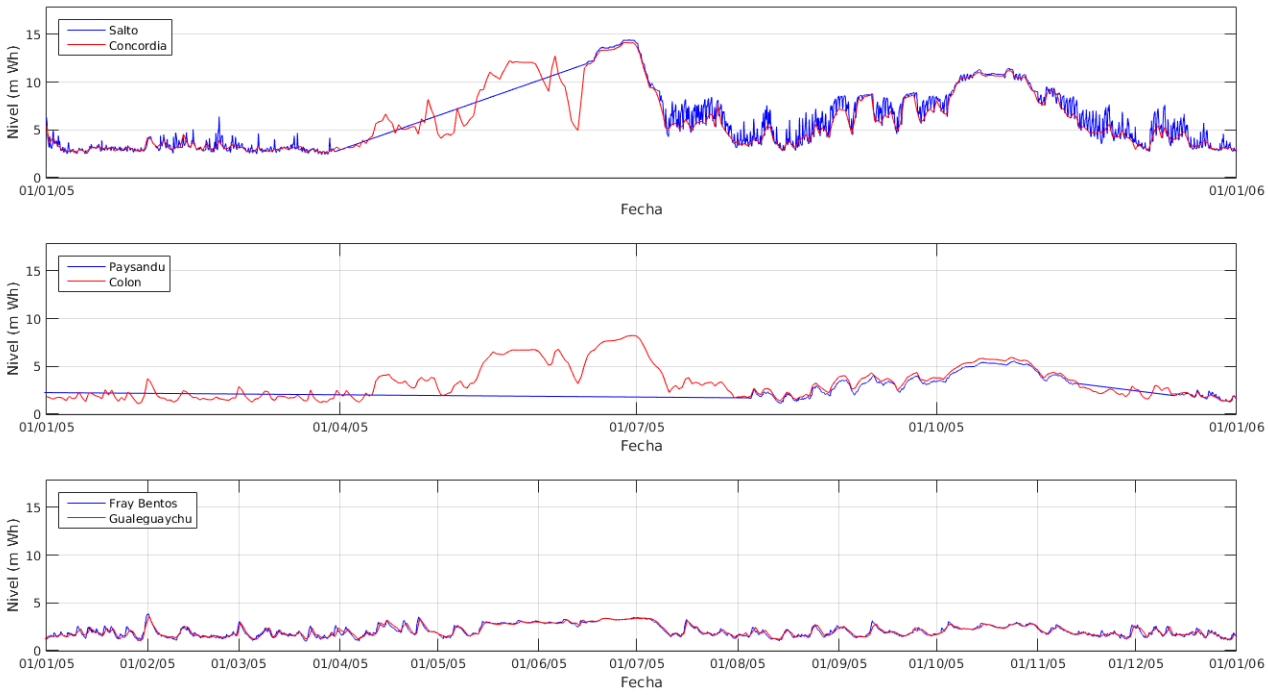


Figura 1.65: Márgenes opuestas - 2005.

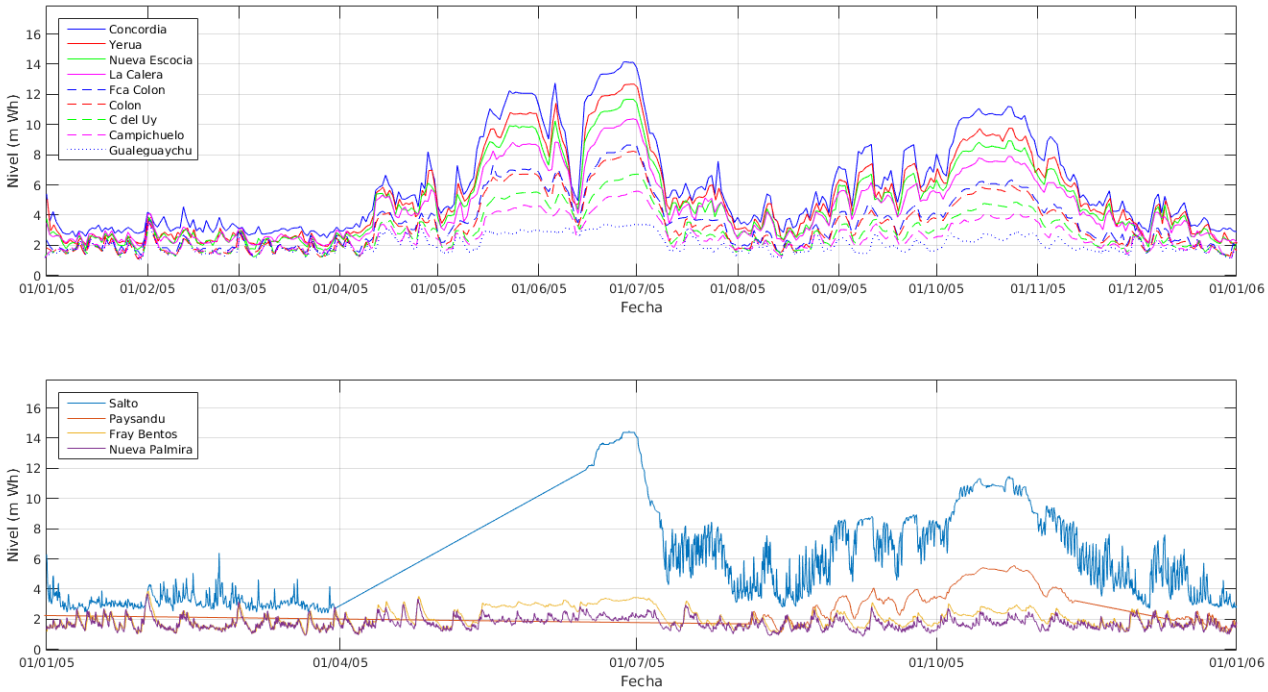


Figura 1.66: Misma margen - 2005.

1.4.27. 2006

Márgenes opuestas

Se cuenta con datos para todas las estaciones. Paysandú presenta un vacío a finales de febrero y principios de marzo. Las estaciones en márgenes opuestas presentan un comportamiento similar en términos de su evolución temporal. Las distintas estaciones presentan un comportamiento consistente entre sí.

Misma margen

Las estaciones presentan un comportamiento consistente entre sí y no se observan anomalías.

1.4.28. 2007

Márgenes opuestas

Se cuenta con datos para todas las estaciones, excepto para Salto entre finales de setiembre y principios de diciembre. Las estaciones en márgenes opuestas presentan un comportamiento similar en términos de su evolución temporal. Se observa un cierto alejamiento que aumenta a medida que aumenta el nivel para el caso de Colón y Paysandú. Las distintas estaciones presentan un comportamiento consistente entre sí.

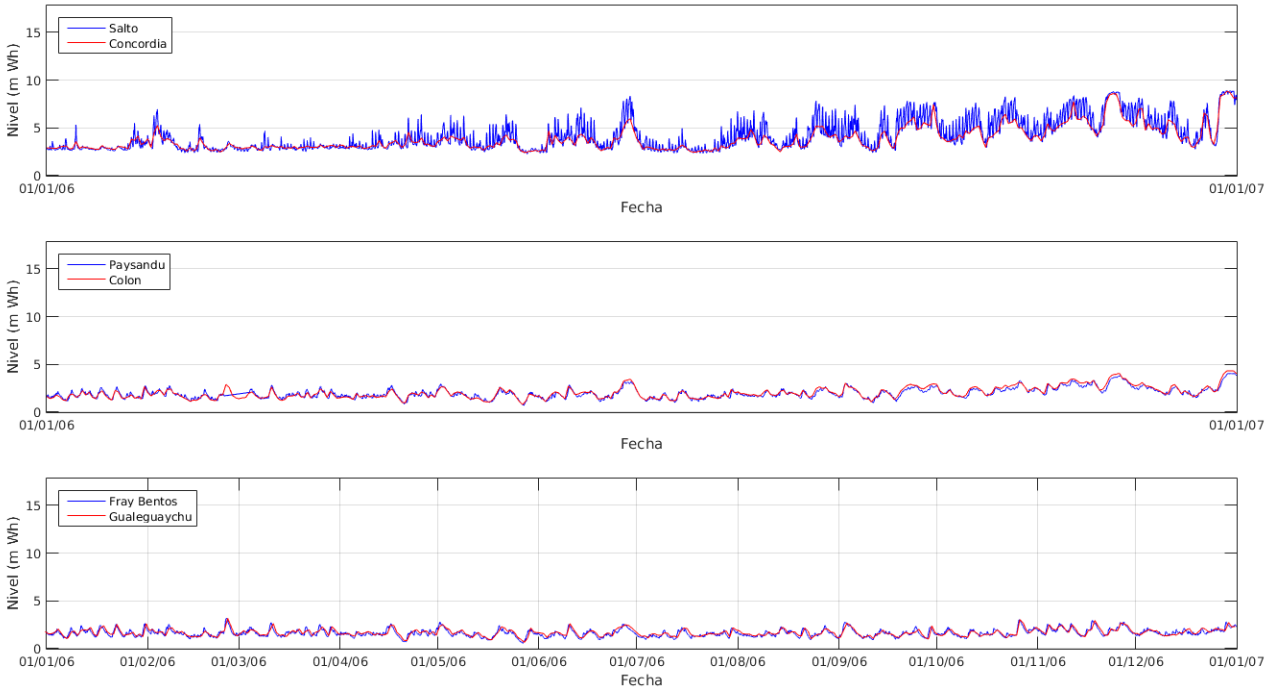


Figura 1.67: Márgenes opuestas - 2006.

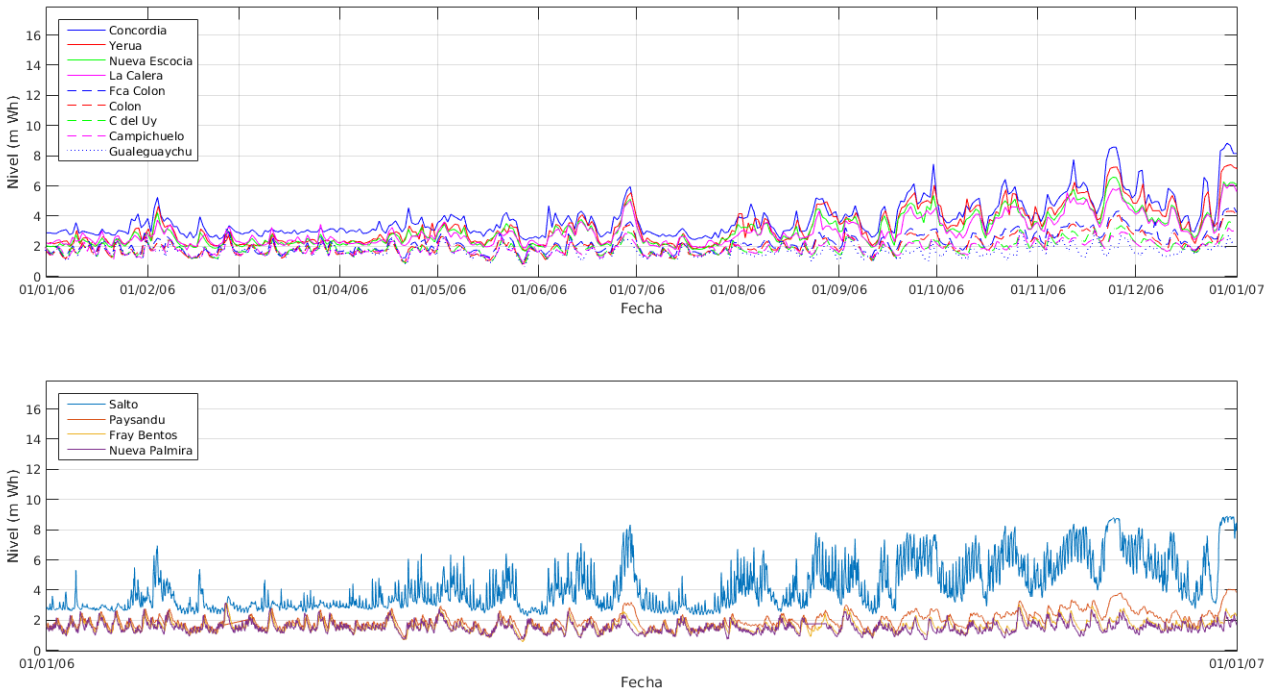


Figura 1.68: Misma margen - 2006.

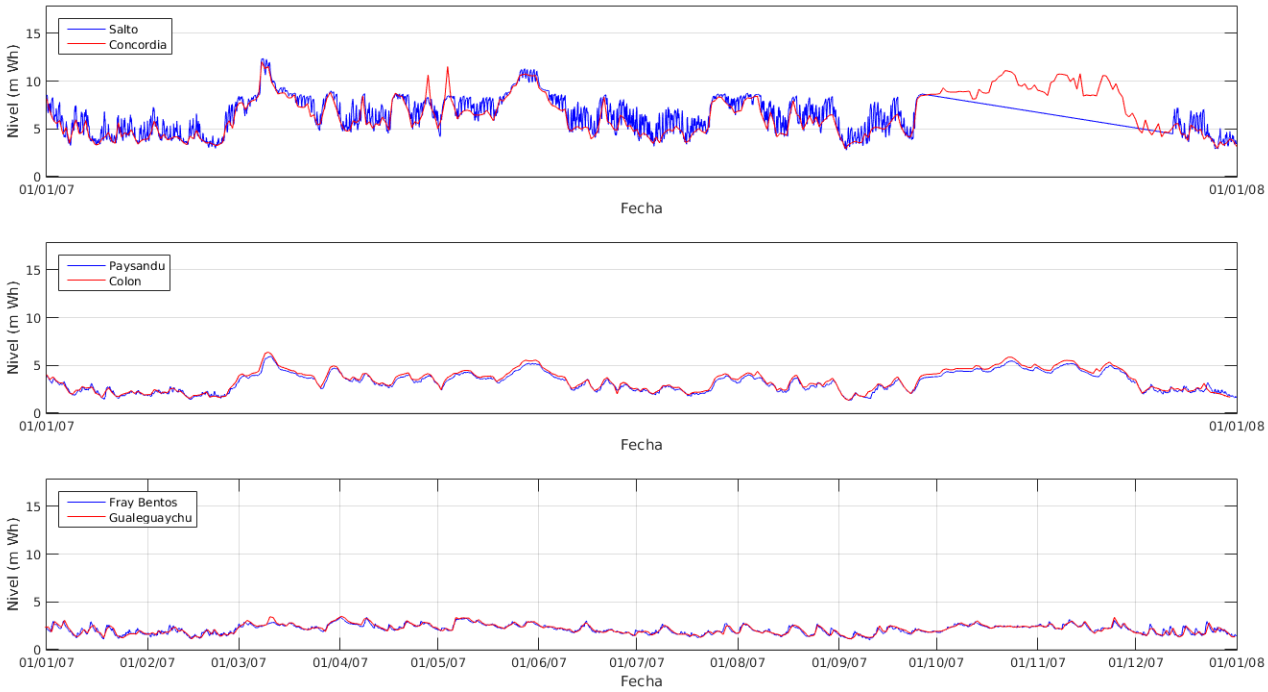


Figura 1.69: Márgenes opuestas - 2007.

Misma margen

Nueva Escocia presenta un vacío en el mes de junio. Las restantes estaciones presentan un comportamiento consistente entre sí y no se observan anomalías.

1.4.29. 2008

Márgenes opuestas

Se cuenta con datos para todas las estaciones. Las estaciones en márgenes opuestas presentan un comportamiento similar en términos de su evolución temporal. Se observa un cierto alejamiento que aumenta a medida que aumenta el nivel para el caso de Colón y Paysandú, al igual que para Salto y Concordia. Las distintas estaciones presentan un comportamiento consistente entre sí.

Misma margen

Las estaciones presentan un comportamiento consistente entre sí y no se observan anomalías.

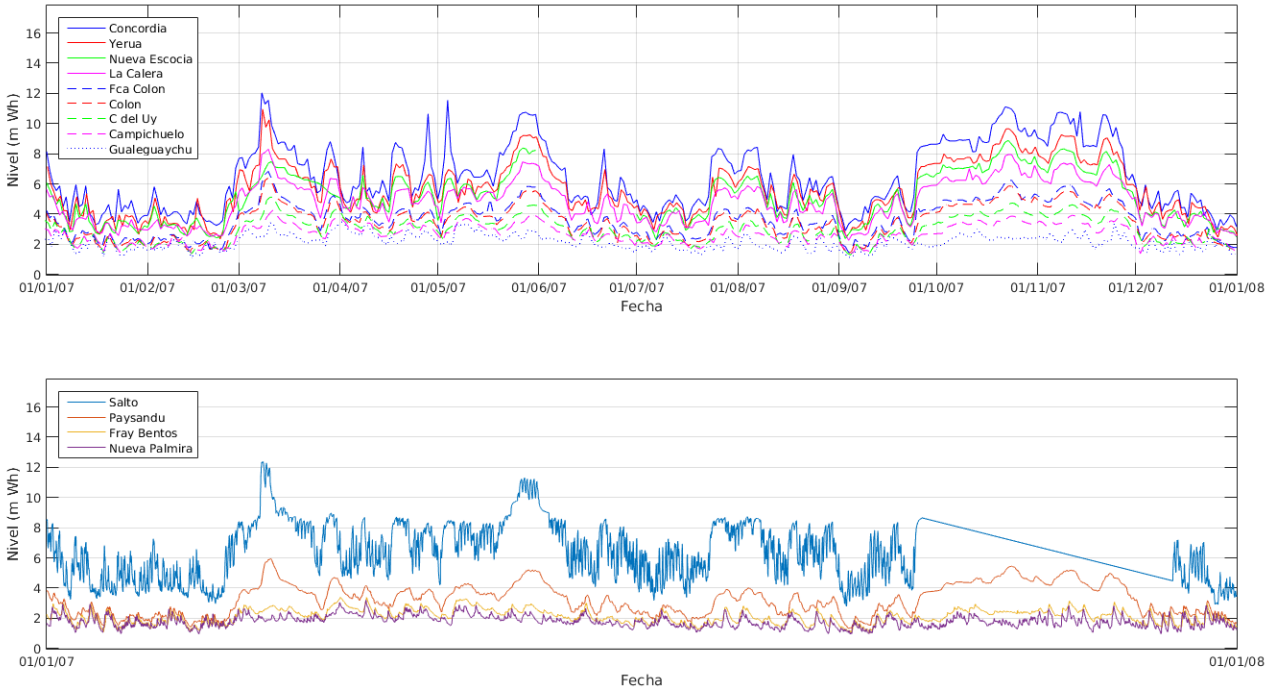


Figura 1.70: Misma margen - 2007.

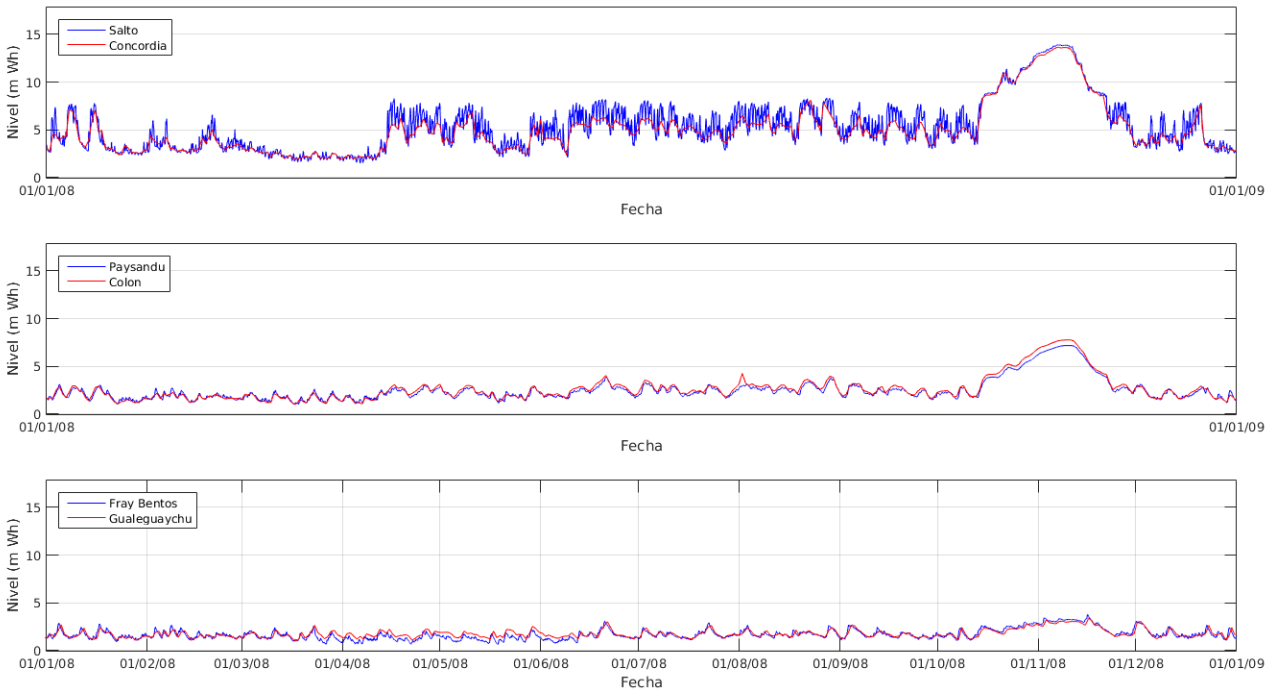


Figura 1.71: Márgenes opuestas - 2008.

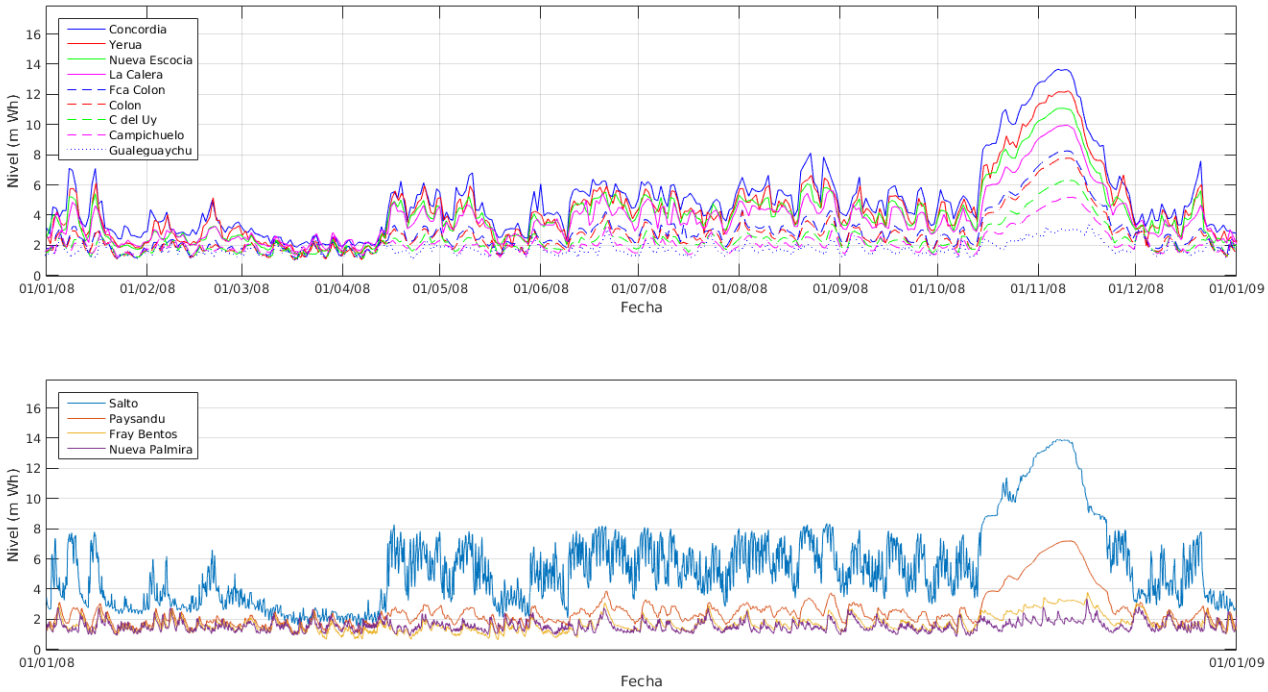


Figura 1.72: Misma margen - 2008.

1.4.30. 2009

Márgenes opuestas

Se cuenta con datos en todas las estaciones, excepto en Salto desde principios de octubre hasta diciembre inclusive. En esta estación se observa una anomalía en el registro de niveles a principios de octubre, donde se presentan valores puntuales muy por encima de lo esperable y de lo registrado en Concordia, entendiéndose que estos valores son erróneos. Las estaciones en márgenes opuestas presentan un comportamiento similar en términos de su evolución temporal. Se observa un cierto alejamiento que aumenta a medida que aumenta el nivel para el caso de Colón y Paysandú. Las distintas estaciones presentan un comportamiento consistente entre sí.

Misma margen

Las estaciones presentan un comportamiento consistente entre sí y no se observan anomalías.

1.4.31. 2010

Márgenes opuestas

Se cuenta con datos para todas las estaciones, excepto para Salto en los meses de enero, febrero y principios de marzo, así como para Fray Bentos entre finales de junio y principios de setiembre. Se constatan anomalías en el comportamiento de los registros en Salto a partir

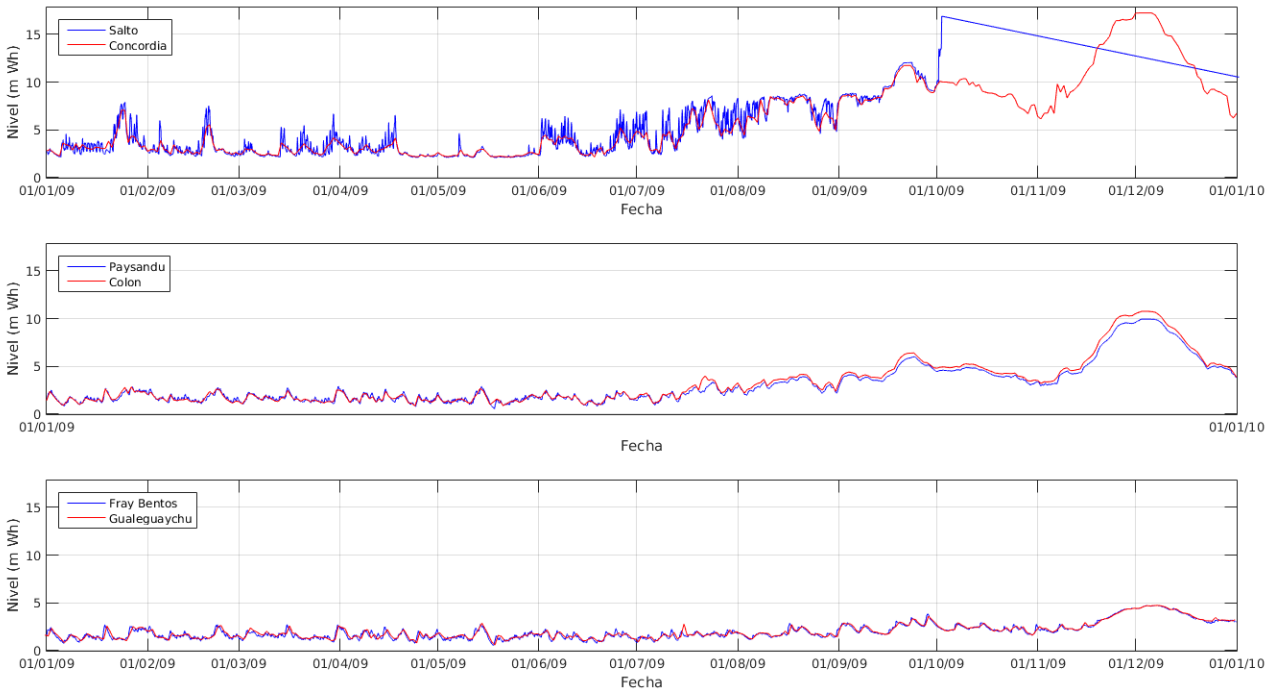


Figura 1.73: Márgenes opuestas - 2009.

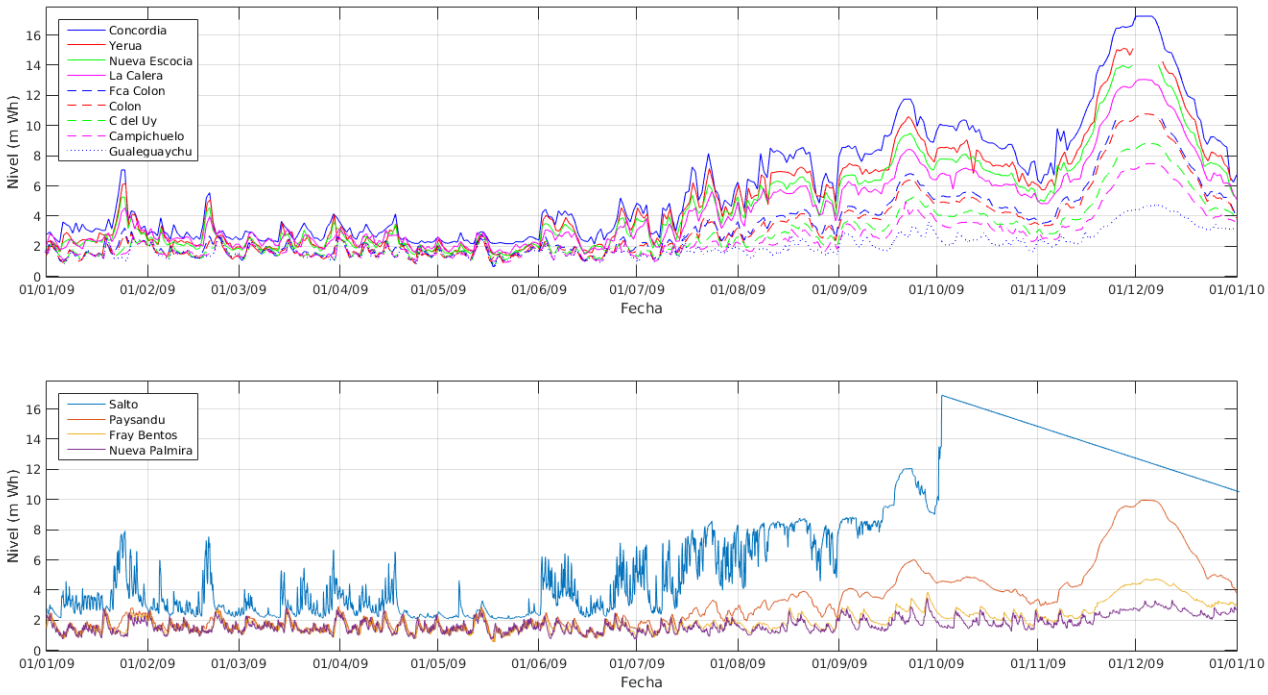


Figura 1.74: Misma margen - 2009.

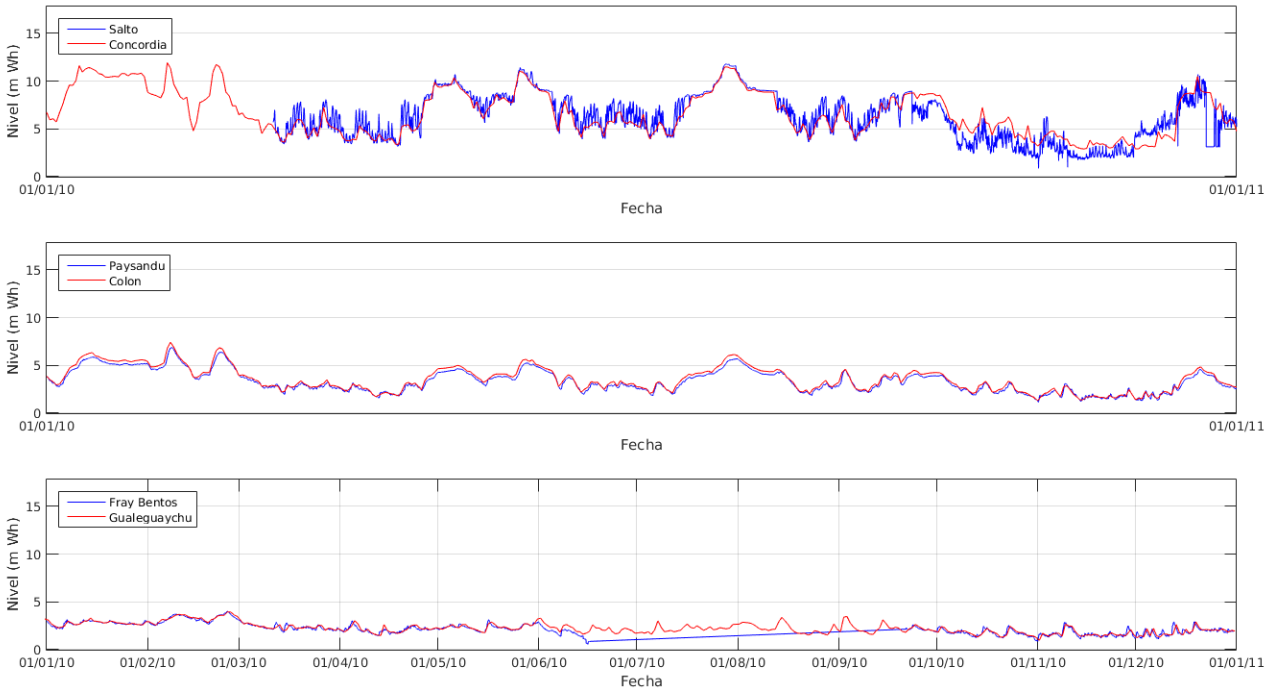


Figura 1.75: Márgenes opuestas - 2010.

del mes de octubre aproximadamente, donde se tiene un alejamiento entre esta estación y lo registrado en Concordia. Fuera de esto, las estaciones en márgenes opuestas presentan un comportamiento similar en términos de su evolución temporal. Se observa un cierto alejamiento que aumenta a medida que aumenta el nivel para el caso de Colón y Paysandú. Las distintas estaciones presentan un comportamiento consistente entre sí.

Misma margen

Las estaciones presentan un comportamiento consistente entre sí y no se observan anomalías.

1.4.32. 2011

Márgenes opuestas

No se cuenta con datos en la estación Fray Bentos, así como tampoco en la estación Salto entre los meses de agosto y diciembre inclusive. Se constatan anomalías en el comportamiento de los registros en Salto, los cuales presentan caídas puntuales que se alejan del comportamiento esperable, y un alejamiento de la serie de niveles de Concordia a partir del mes de abril. En función de esto se entiende que los datos de Salto para el año en cuestión son de mala calidad o erróneos. Las restantes estaciones en márgenes opuestas presentan un comportamiento similar en términos de su evolución temporal. Se observa un cierto alejamiento que aumenta a medida

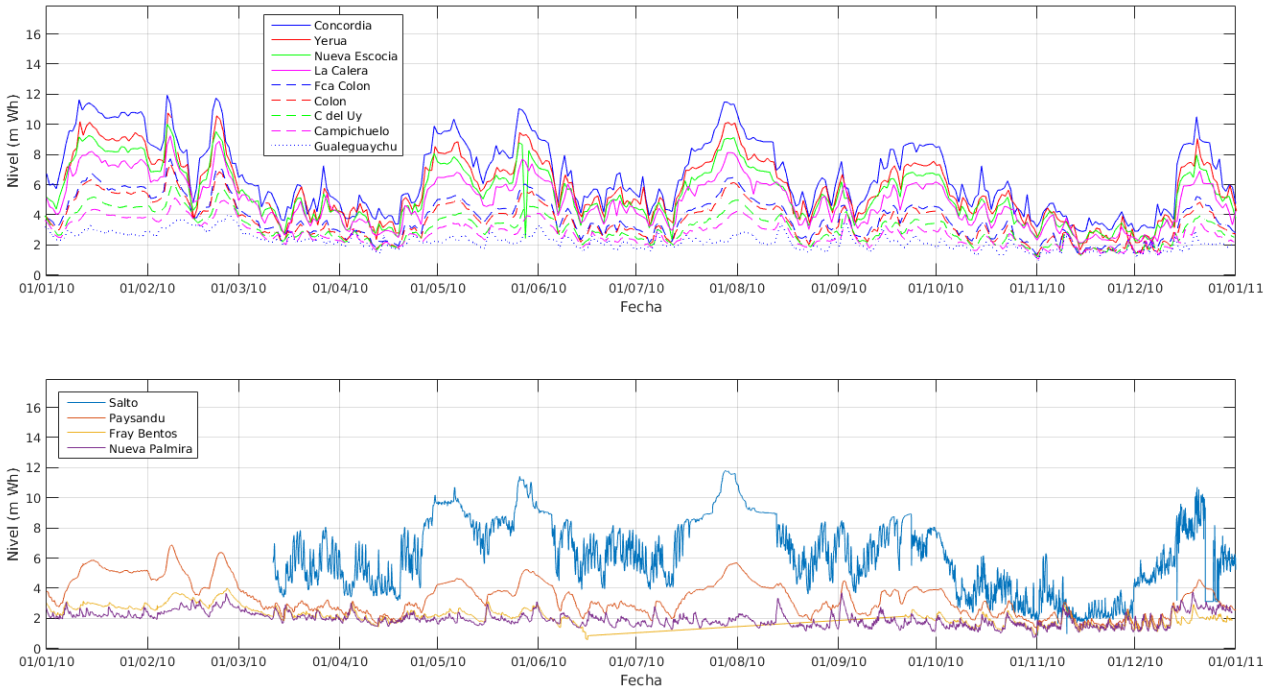


Figura 1.76: Misma margen - 2010.

que aumenta el nivel para el caso de Colón y Paysandú. Las distintas estaciones presentan un comportamiento consistente entre sí.

Misma margen

Las estaciones presentan un comportamiento consistente entre sí y no se observan anomalías.

1.4.33. 2012

Márgenes opuestas

No se cuenta con datos para las estaciones de Salto ni Fray Bentos sino hasta principios de diciembre. A partir de 2012 tampoco se cuenta con más datos de la estación Gualeguaychú. Para el caso de Fray Bentos, los datos disponibles son dispersos, presentando vaciós. Donde hay datos disponibles, las estaciones en márgenes opuestas presentan un comportamiento similar en términos de su evolución temporal. Se observa un cierto alejamiento que aumenta a medida que aumenta el nivel para el caso de Colón y Paysandú. Las distintas estaciones presentan un comportamiento consistente entre sí.

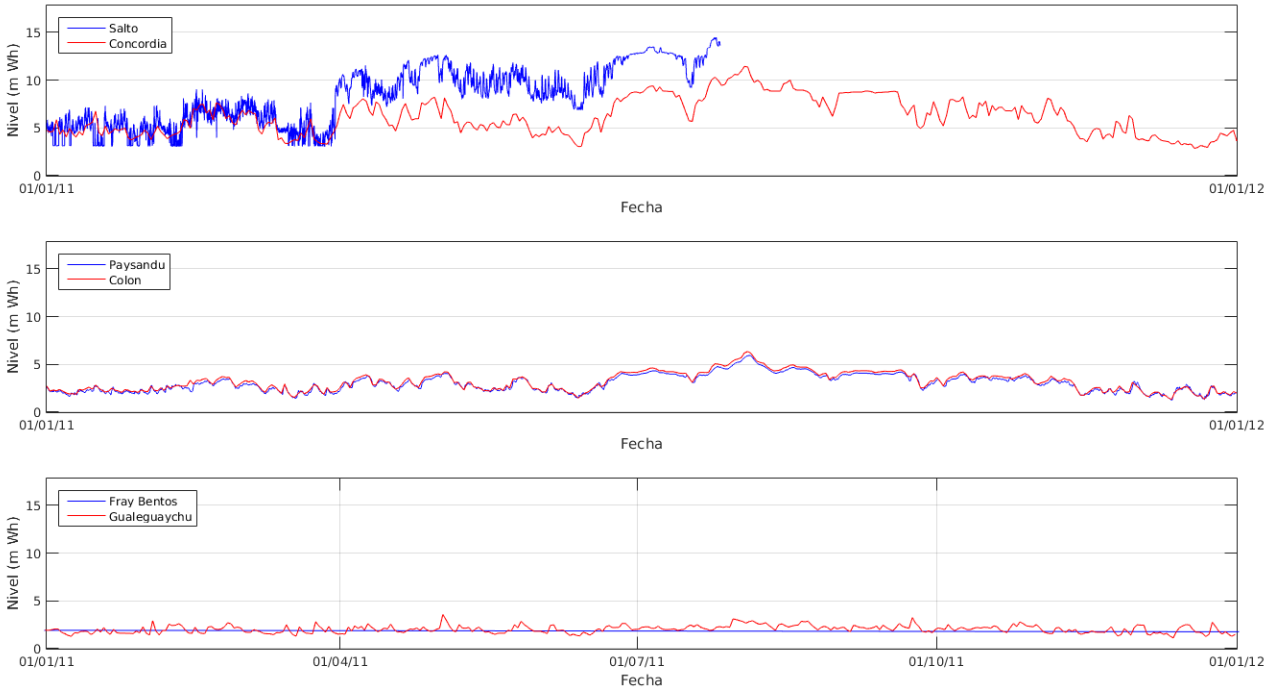


Figura 1.77: Márgenes opuestas - 2011.

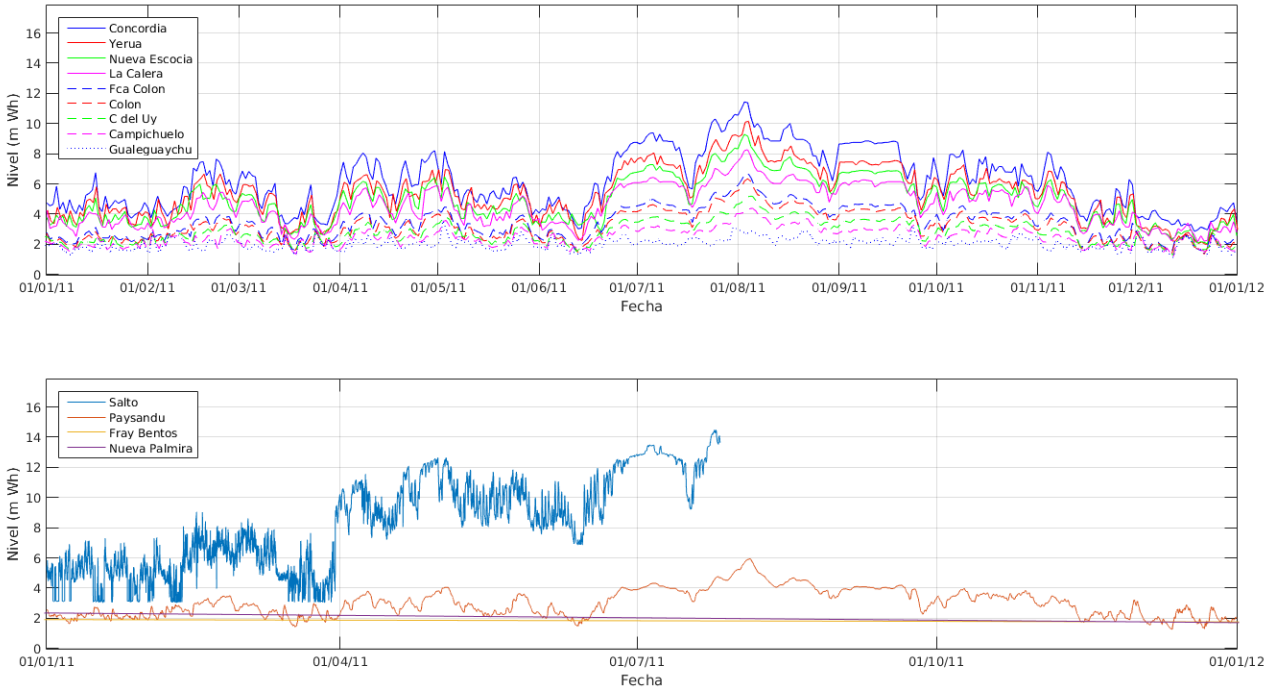


Figura 1.78: Misma margen - 2011.

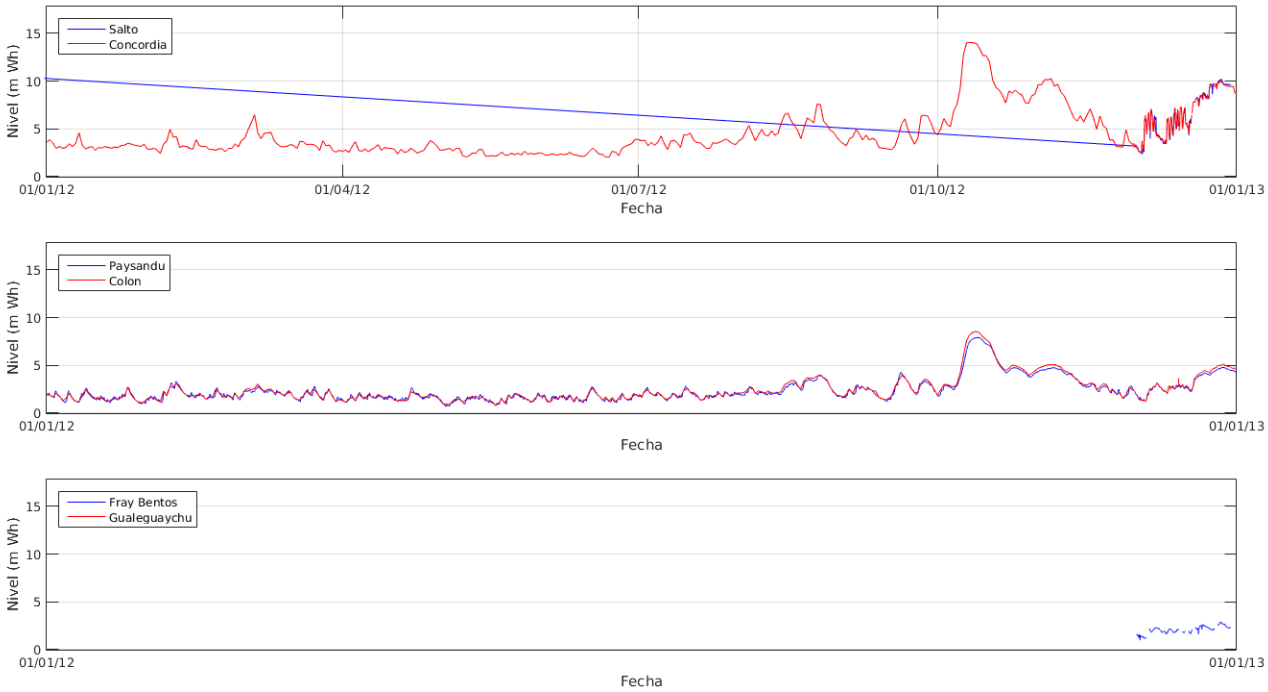


Figura 1.79: Márgenes opuestas - 2012.

Misma margen

No se cuenta con datos para Campichuelo, Gualeguaychú. Nueva Palmira y Concepción del Uruguay presentan datos en el mes de diciembre únicamente. Las restantes estaciones presentan un comportamiento consistente entre sí y no se observan anomalías.

1.4.34. 2013

Márgenes opuestas

Se cuenta con datos para todas las estaciones excepto Gualeguaychú. Los datos disponibles para Fray Bentos presentan vacíos y tienen poca consistencia temporal, entendiéndose que son de mala calidad. Salto presenta algunas anomalías asociadas a registros puntuales que se encuentran por debajo de los valores esperables para la curva de evolución temporal. Las restantes estaciones en márgenes opuestas presentan un comportamiento similar en términos de su evolución temporal. Se observa un cierto alejamiento que aumenta a medida que aumenta el nivel para el caso de Colón y Paysandú. Las distintas estaciones presentan un comportamiento consistente entre sí.

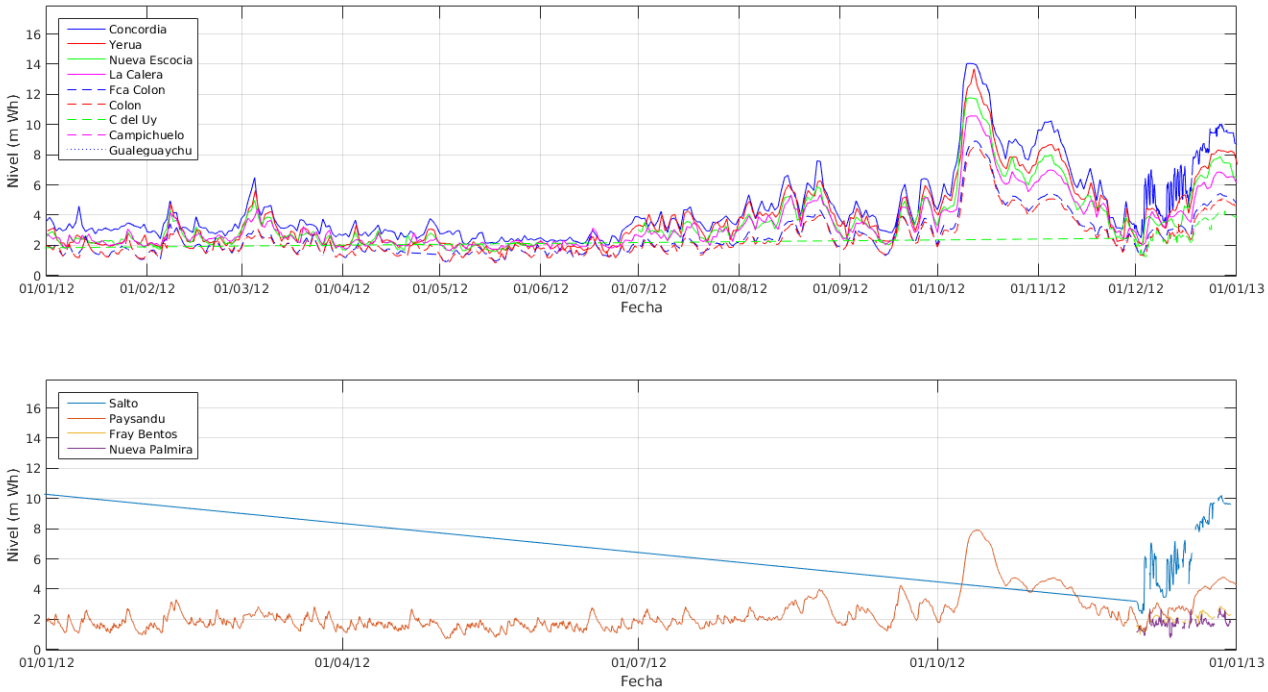


Figura 1.80: Misma margen - 2012.

Misma margen

No se cuenta con datos para Campichuelo ni Gualeguaychú. Nueva Escocia presenta vacíos en los meses de octubre a diciembre, mientras que Fábrica Colón lo hace entre los meses de junio a diciembre. Nueva Palmira presenta tramos cortos sin registros a lo largo de todo el año. Los registros de Nueva Escocia presentan algunas anomalías y no se ajustan del todo al comportamiento global de las demás series. Fábrica Colón presenta un valor puntual inferior a lo esperable. Las restantes estaciones presentan un comportamiento consistente entre sí y no se observan anomalías.

1.4.35. 2014

Márgenes opuestas

Se cuenta con datos para todas las estaciones excepto Gualeguaychú. Los datos disponibles para Fray Bentos presentan vacíos y tienen poca consistencia temporal, entendiéndose que son de mala calidad. Salto presenta algunas anomalías asociadas a registros puntuales que se encuentran por debajo de los valores esperables para la curva de evolución temporal. La serie de datos de Paysandú presenta vacíos en los meses de julio y agosto, y luego de estos, presenta un comportamiento anómalo que no se puede rastrear a los datos originales, por lo cual se entiende que estos datos son erróneos. Las restantes estaciones en márgenes opuestas presentan un comportamiento similar en términos de su evolución temporal. Se observa un cierto

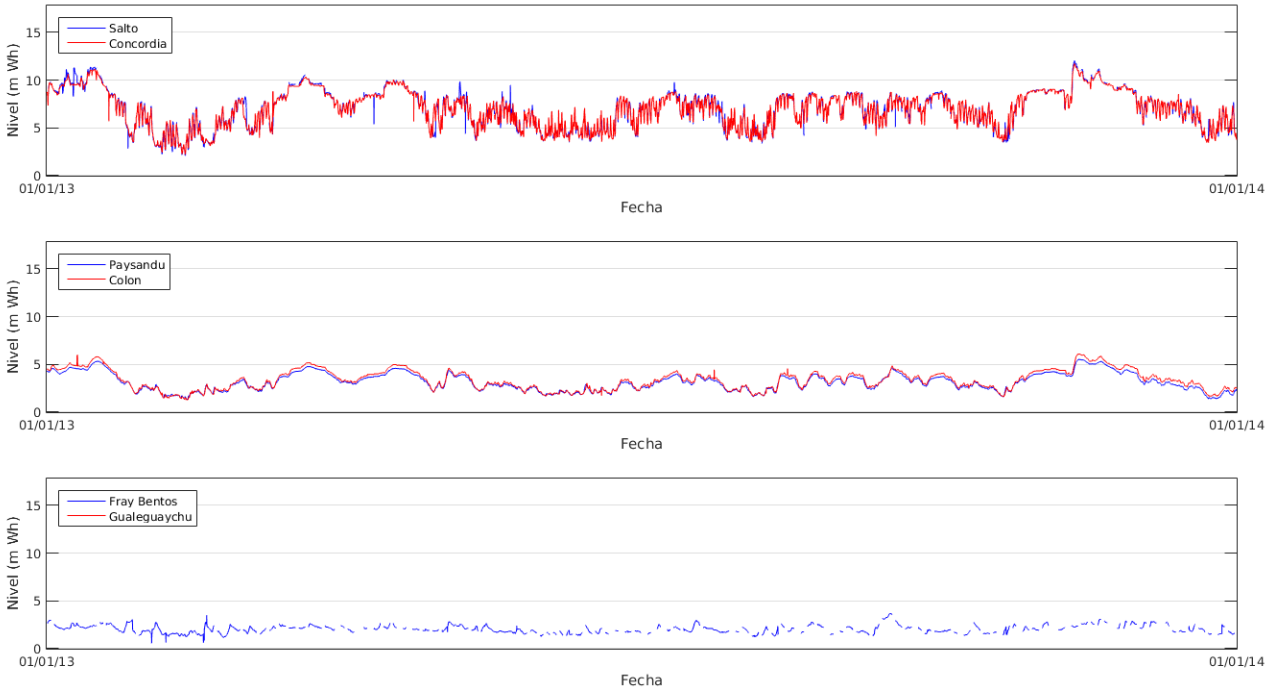


Figura 1.81: Márgenes opuestas - 2013.

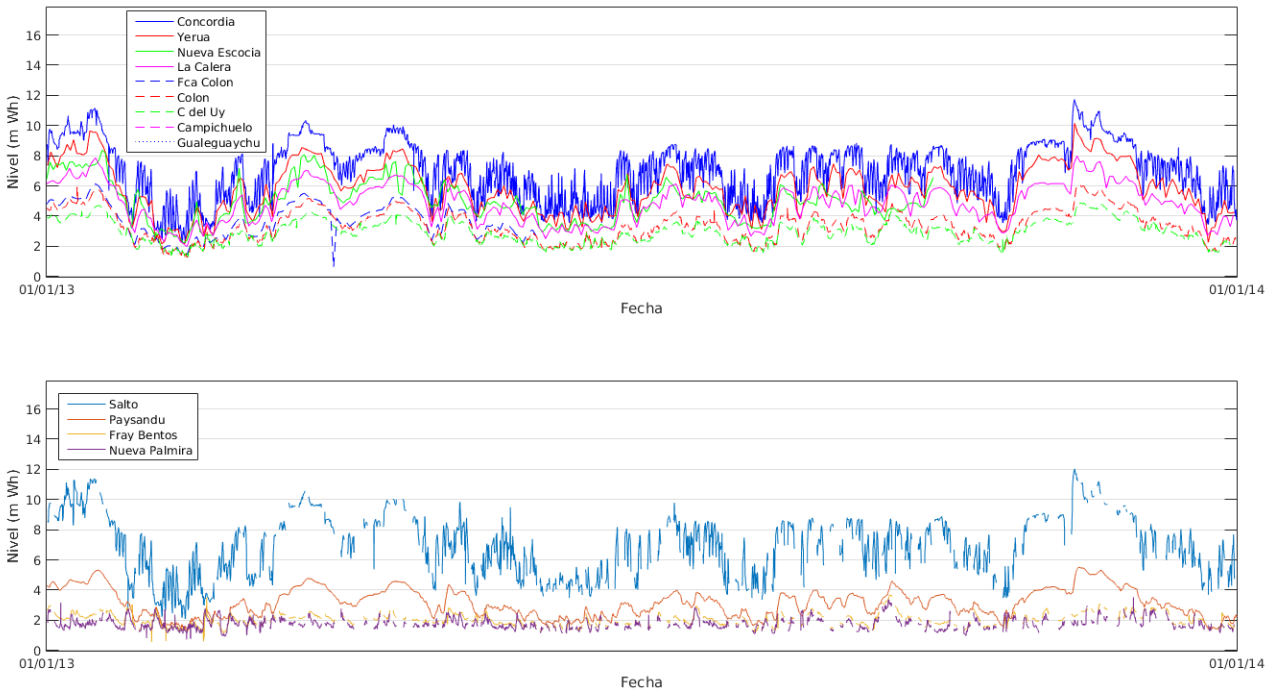


Figura 1.82: Misma margen - 2013.

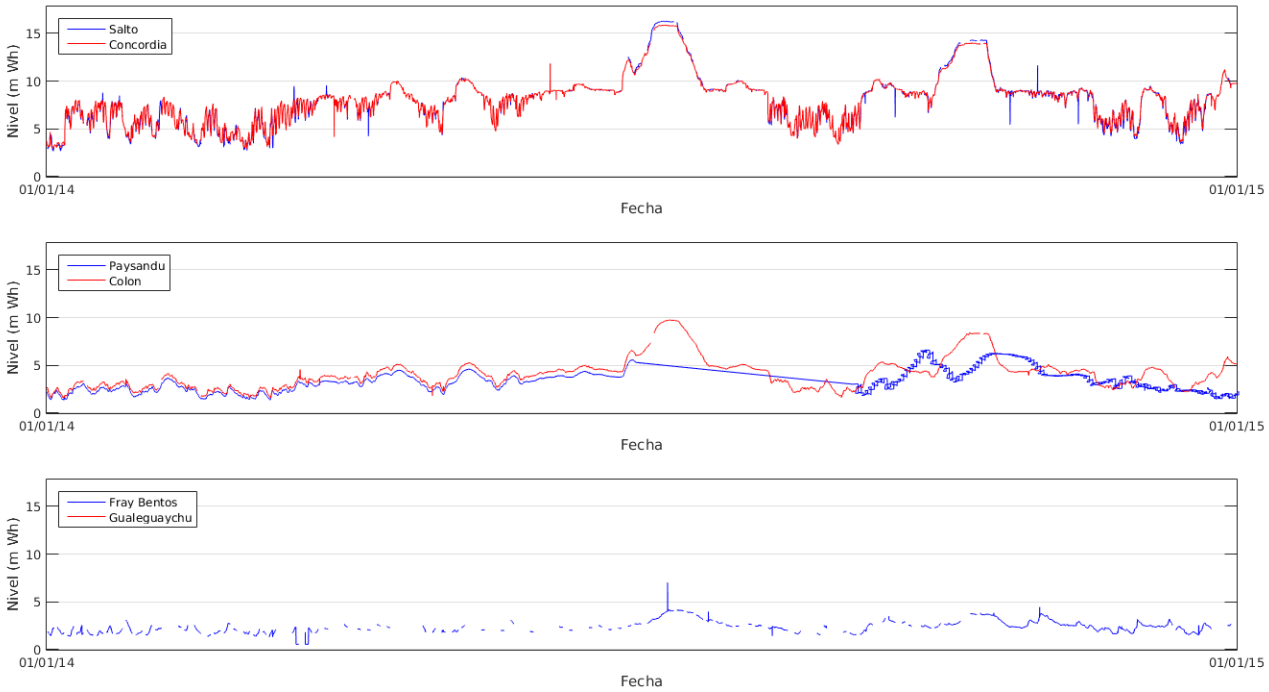


Figura 1.83: Márgenes opuestas - 2014.

alejamiento que aumenta a medida que aumenta el nivel para el caso de Colón y Paysandú. Las distintas estaciones presentan un comportamiento consistente entre sí.

Misma margen

No se cuenta con datos para Yeruá, Nueva Escocia, La Calera, Fábrica Colón, Campichuelo ni Gualeguaychú. Concepción del Uruguay presenta vacíos en los meses de enero y febrero. Nueva Palmira presenta tramos cortos sin registros a lo largo de todo el año. Las restantes estaciones presentan un comportamiento consistente entre sí y no se observan anomalías.

1.4.36. 2015

Márgenes opuestas

Los datos disponibles en este año presentan varios vacíos y anomalías, entendiéndose que son de mala calidad. Dentro de los datos disponibles para las estaciones de Salto, Concordia y Colón se puede ver que son consistentes entre ellos. Paysandú continúa presentando un comportamiento anómalo, alejado de los registros de Colón.

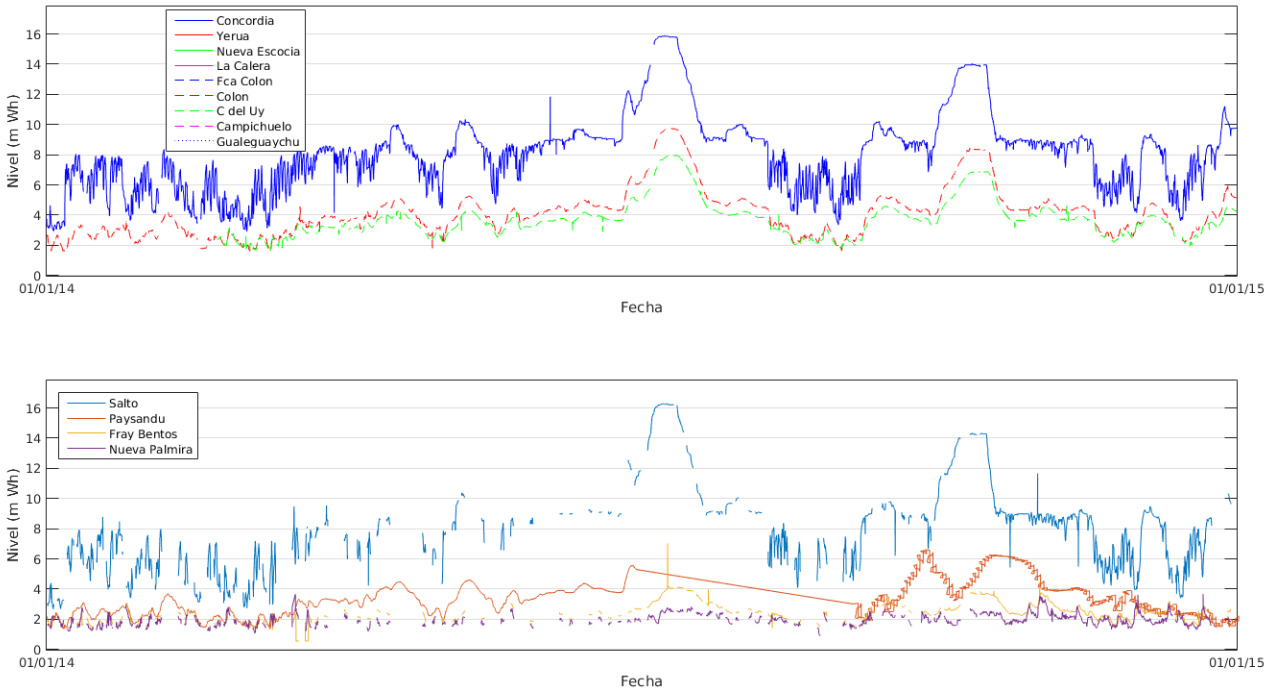


Figura 1.84: Misma margen - 2014.

Misma margen

No se cuenta con datos para Yeruá, Nueva Escocia, La Calera, Fábrica Colón, Campichuelo ni Gualeguaychú. Colón y Concepción del Uruguay presentan vacíos en los meses de abril a junio y entre finales de octubre y diciembre inclusive. Nueva Palmira presenta tramos cortos sin registros a lo largo de todo el año. Las estaciones presentan un comportamiento consistente entre sí.

1.4.37. 2016

En este año sólo se dispone de datos para la estación de Paysandú hasta mediados del año, los cuales presentan el mismo comportamiento anómalo que en años anteriores. Se entiende que estos datos son de mala calidad o erróneos.

1.5. Análisis exploratorio

1.5.1. Procesamiento previo

Previo al análisis exploratorio de las distintas series de niveles disponibles, se realiza un pasaje de los datos de niveles registrados a un mismo sistema de referencia. Se toma como origen para las coordenadas verticales el cero del Plano de Referencia Hidrométrico - ex Wharton

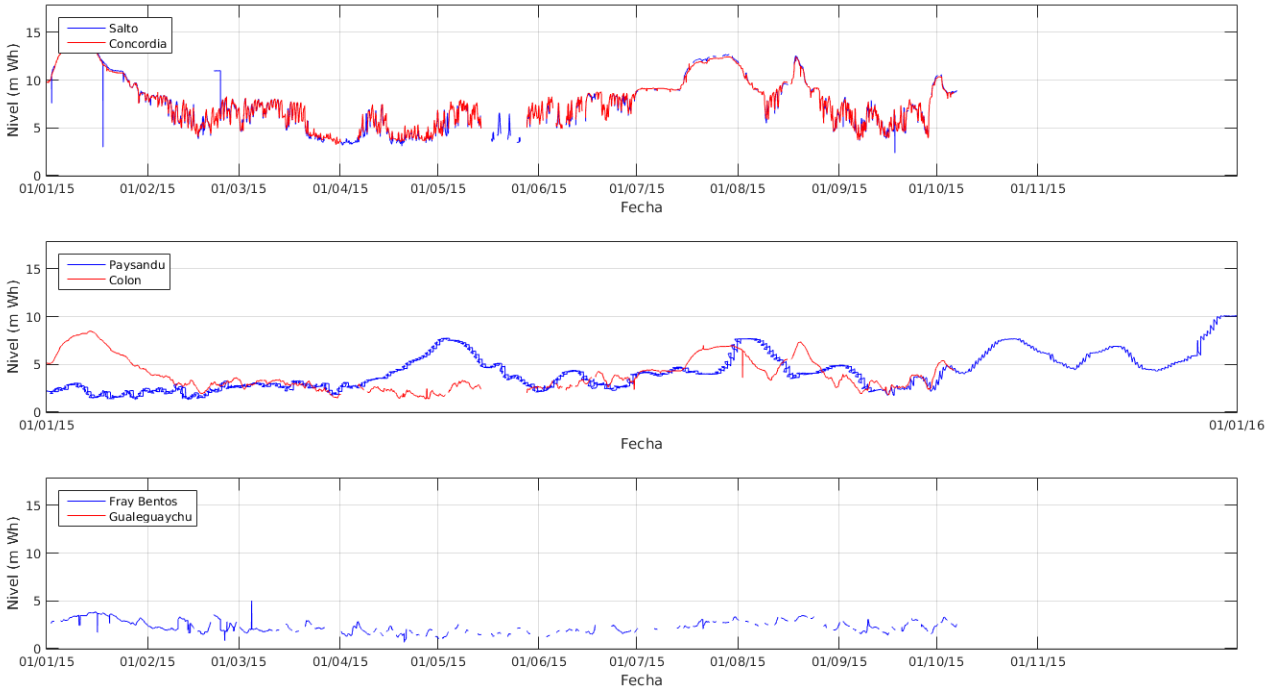


Figura 1.85: Márgenes opuestas - 2015.

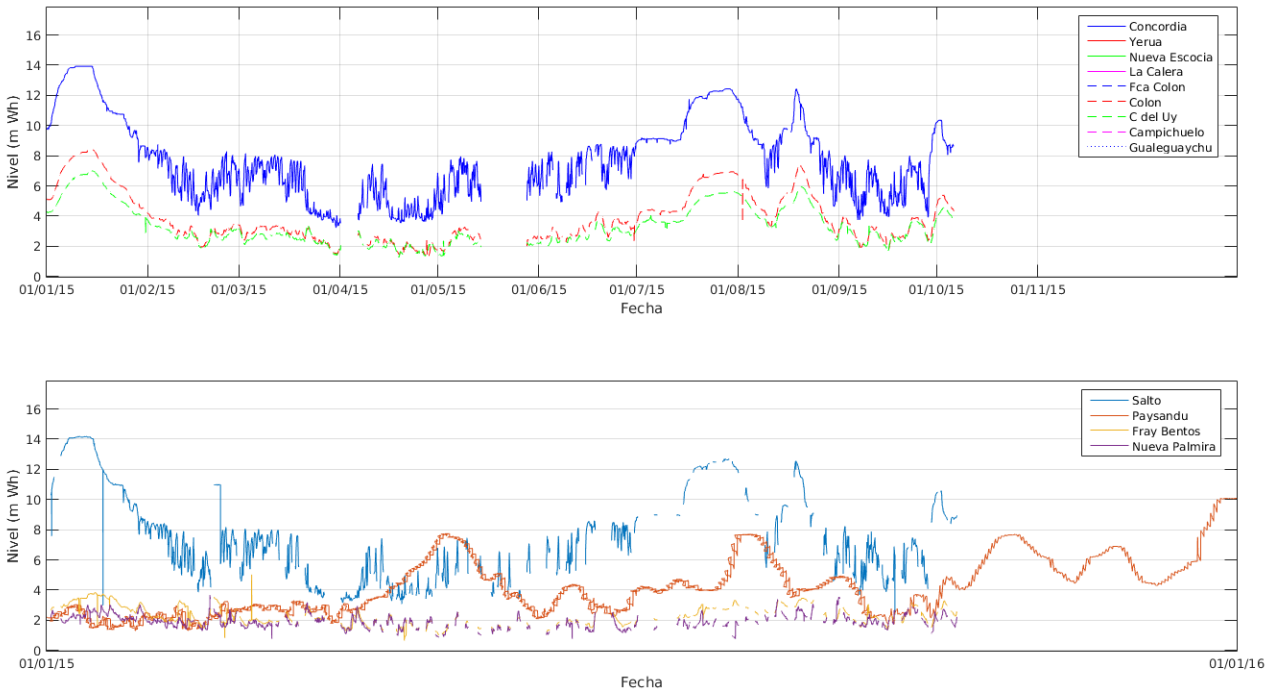


Figura 1.86: Misma margen - 2015.

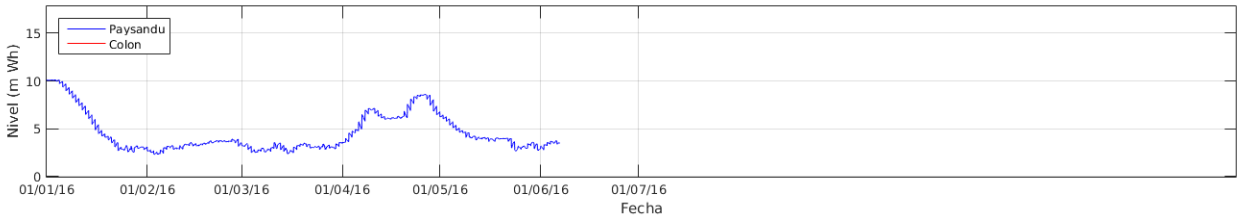


Figura 1.87: Márgenes opuestas - 2016.

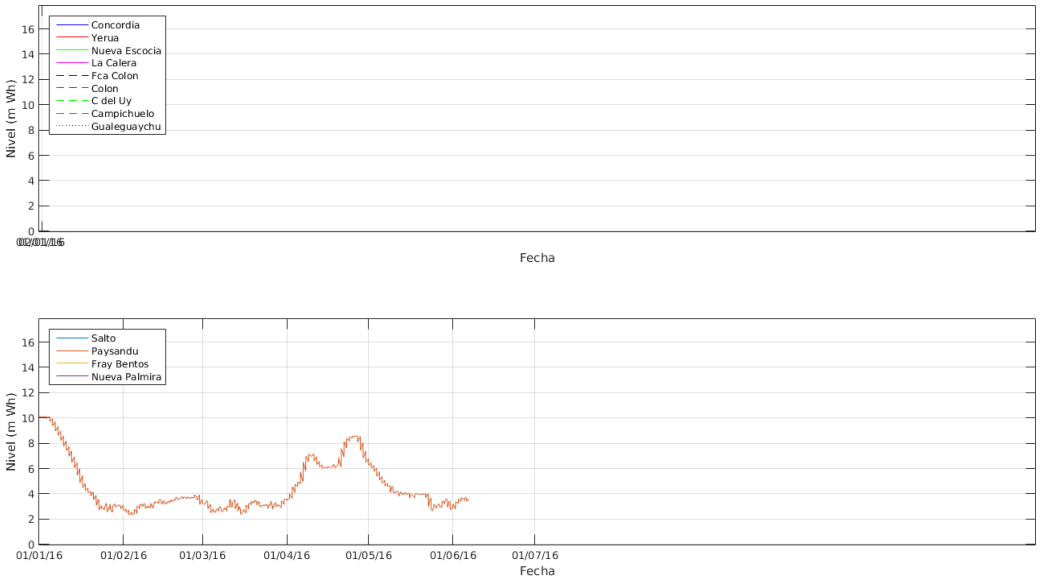


Figura 1.88: Misma margen - 2016.

Tabla 1.28: Cero local respecto a ceros MOP y PRH

Estación	Cero local	
	m PRH	m MOP
Salto	1,98	1,8436
Concordia	1,9474	1,811
Yeruá	1,1514	1,015
Nueva Escocia	1,2734	1,137
La Calera	1,1414	1,005
Fábrica Colón	0,6344	0,498
Colón	0,5894	0,453
Paysandú	1,02	0,8836
Concepción del Uruguay	0,6144	0,478
Campichuelo	0,5844	0,448
Gualeguaychú	0,5074	0,371
Fray Bentos	0,55	0,4136
Nueva Palmira	0,72	0,5836
Carmelo	0,76	0,6236
Conchillas	0,6	0,4636

(PRH). La trasposición de los valores de cada estación, en caso de ser necesaria, se hace en función de los valores presentados en la tabla 1.28. Para las estaciones uruguayas se cuenta directamente con la altura del cero local expresada en términos del cero PRH. Para las estaciones argentinas se cuenta con el cero local expresado en términos del cero MOP (Ministerio de Obras Públicas), el cual expresado en referencia al cero PRH tiene una cota de 0,1364 m.

1.5.2. Metodología

Se sistematizó la información disponible en cada una de las estaciones mencionadas, realizando un análisis de calidad de los datos, y cuantificando la densidad de los mismos tanto por día como por mes. Se descartaron tramos de las series donde se observaran anomalías que no pudieran ser corregidas en base a un análisis más minucioso de los datos originales. Se descartan las series de Carmelo y Conchillas (ver Apéndice 1.4). Luego de esto, se separó cada serie, en caso de que correspondiera, en tramos con la misma frecuencia de registro de datos. Los tramos obtenidos se muestran en la tabla 1.29.

Sobre la totalidad de los datos de esta manera depurados, se calcularon parámetros estadísticos básicos como el nivel medio y su desviación estándar. Se presentan gráficos de la evolución temporal de cada serie en distintas escalas temporales: totalidad de la duración de la serie, un año particular y un mes particular, de modo de contar con una noción del comportamiento de la variable en cuestión.

De modo de visualizar la variación anual de los niveles, se consideran las series de datos

correspondientes a cada mes (todos los meses de enero juntos en una serie, todos los de febrero y así). En base a estas series se realiza un gráfico de barras indicando el nivel medio de ese mes y su desviación estándar, y un gráfico tipo boxplot donde se muestra la mediana de cada mes, sus percentiles 75 y 25 y valores extraordinarios (calculados como los valores mayores a $p_{75} + 1,5 \times (p_{75} - p_{25})$ y menores a $p_{25} - 1,5 \times (p_{75} - p_{25})$).

A los efectos de visualizar la distribución de los valores de niveles (densidad de frecuencia muestral relativa), se presenta un histograma de cada serie de niveles. Se presenta además un gráfico de frecuencia muestral relativa acumulada, o lo que es lo mismo, de la frecuencia de no excedencia de niveles (complementario de la frecuencia de excedencia).

Tabla 1.29: Tramos con la misma densidad de registros

Estación	Tramo	Fecha inicio	Fecha fin	Registro
Salto	Salto 1	ene-1980	jul-1986	Diario
	Salto 2	ago-1986	may-2002	3 a 4 por día
	Salto 3	may-2002	ene-2010	Horario
Concordia	Concordia 1	ene-1980	nov-2012	Diario
	Concordia 2	nov-2012	ene-2015	Horario
Yeruá	–	ene-1980	dic-2013	Diario
Nueva Escocia	–	ene-1980	dic-2013	Diario
La Calera	–	mar-1995	dic-2013	Diario
Fca. Colón	–	ene-1980	dic-2013	Diario
Colón	Colón 1	ene-1980	nov-2012	Diario
	Colón 2	nov-2012	oct-2015	Horario
Paysandú	Paysandú 1	ene-1980	dic-1991	3 a 4 por día
	Paysandú 2	ene-1992	dic-1992	Horario
	Paysandú 3	ene-1993	dic-1994	4 por día
	Paysandú 4	ene-1995	dic-2010	Horario
	Paysandú 5	dic-2010	jun-2014	Cada 1/2 hora
C. del Uruguay	Concepción 1	ene-1980	nov-2012	Diario
	Concepción 2	nov-2012	oct-2015	Horario
Campichuelo	–	dic-1982	dic-2011	Diario
Gualeguaychú	–	dic-1982	dic-2011	Diario
Fray Bentos	Fray Bentos 1	sep-1982	jul-1986	3 por día
	Fray Bentos 2	ago-1986	dic-1991	Horario
	Fray Bentos 3	ene-1992	dic-1993	3 por día
	Fray Bentos 4	ene-1994	dic-1994	Horario
	Fray Bentos 5	ene-1995	dic-1995	Diario
	Fray Bentos 6	ene-1996	dic-2010	Horario
Nueva Palmira	Nueva Palmira 1	ene-1980	mar-1980	Horario
	Nueva Palmira 2	mar-1980	dic-1983	2 por día
	Nueva Palmira 3	ene-1984	dic-1985	Horario
	Nueva Palmira 4	ene-1986	jul-1986	2 por día
	Nueva Palmira 5	ago-1986	dic-2010	Horario

1.5.3. Salto 1

Esta serie tiene un nivel medio de 6,88 m PRH y una desviación estándar de 3,44 m. A continuación se presentan gráficos de la serie temporal, "boxplot" para la totalidad de la serie y para cada mes, histograma y frecuencia muestral relativa acumulada.

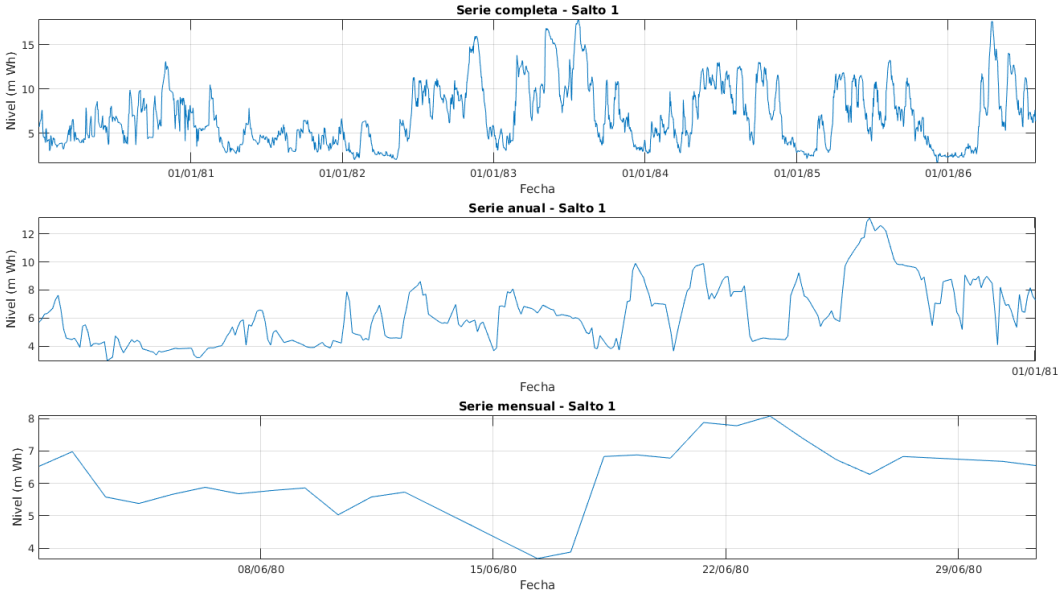


Figura 1.89: Series temporales - Salto 1.

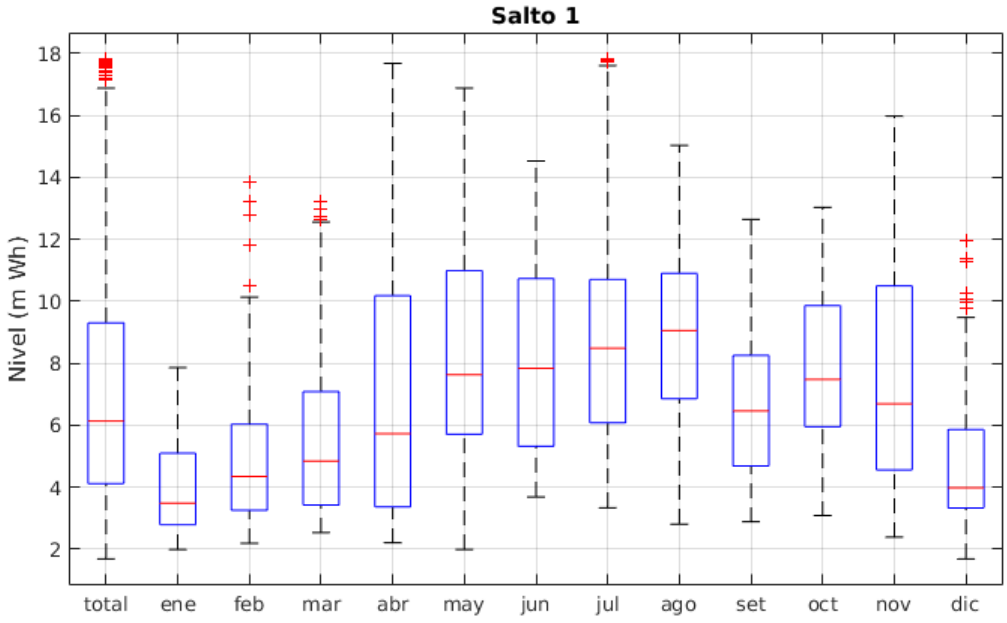
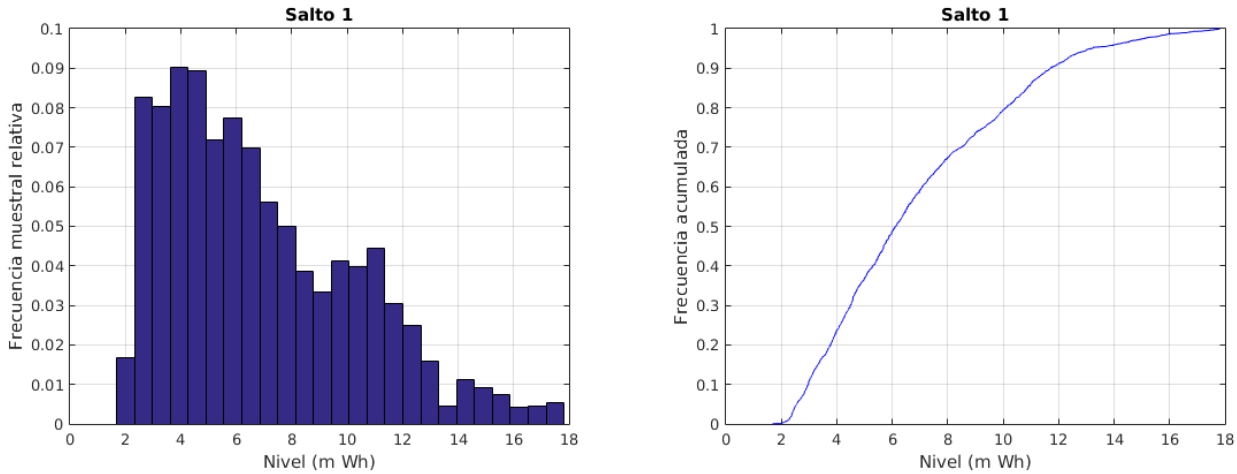


Figura 1.90: Boxplot - Salto 1.



(a) Histograma. **(b)** Frecuencia acumulada.

Figura 1.91: Salto 1

1.5.4. Salto 2

Esta serie tiene un nivel medio de 6,79 m PRH y una desviación estándar de 3,08 m. A continuación se presentan gráficos de la serie temporal, "boxplot" para la totalidad de la serie y para cada mes, histograma y frecuencia muestral relativa acumulada.

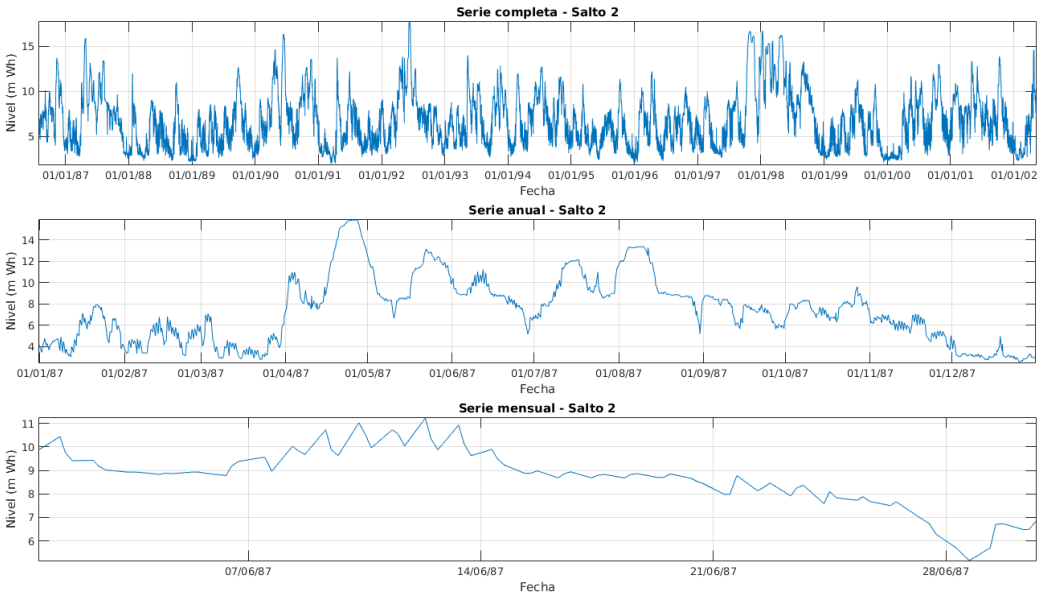
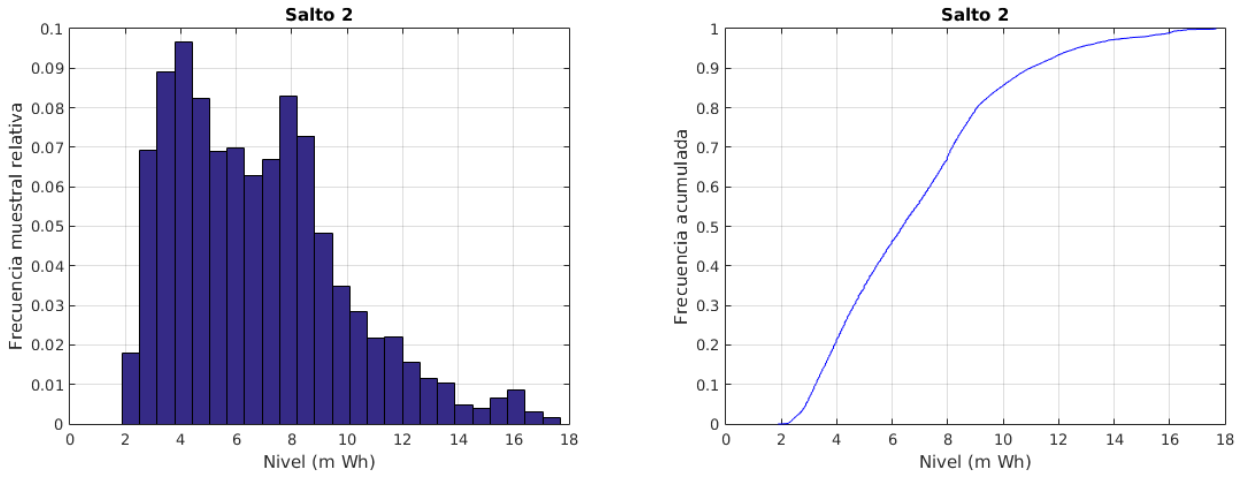


Figura 1.92: Series temporales - Salto 2.



(a) Histograma. **(b)** Frecuencia acumulada.

Figura 1.94: Salto 2

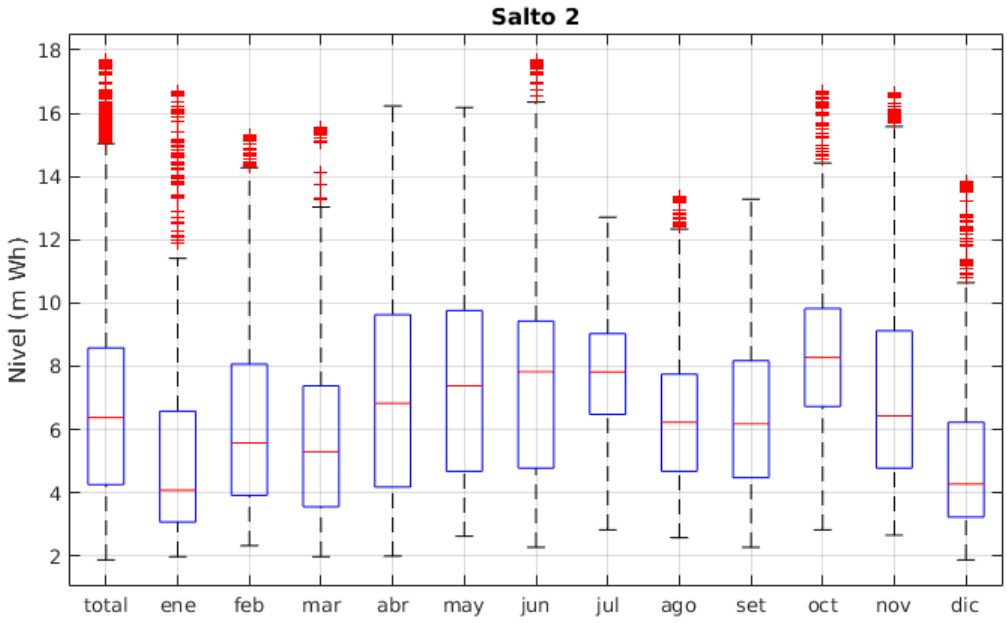


Figura 1.93: Boxplot - Salto 2.

1.5.5. Salto 3

Esta serie tiene un nivel medio de 5,87 m PRH y una desviación estándar de 2,88 m. A continuación se presentan gráficos de la serie temporal, "boxplot" para la totalidad de la serie y para cada mes, histograma y frecuencia muestral relativa acumulada.

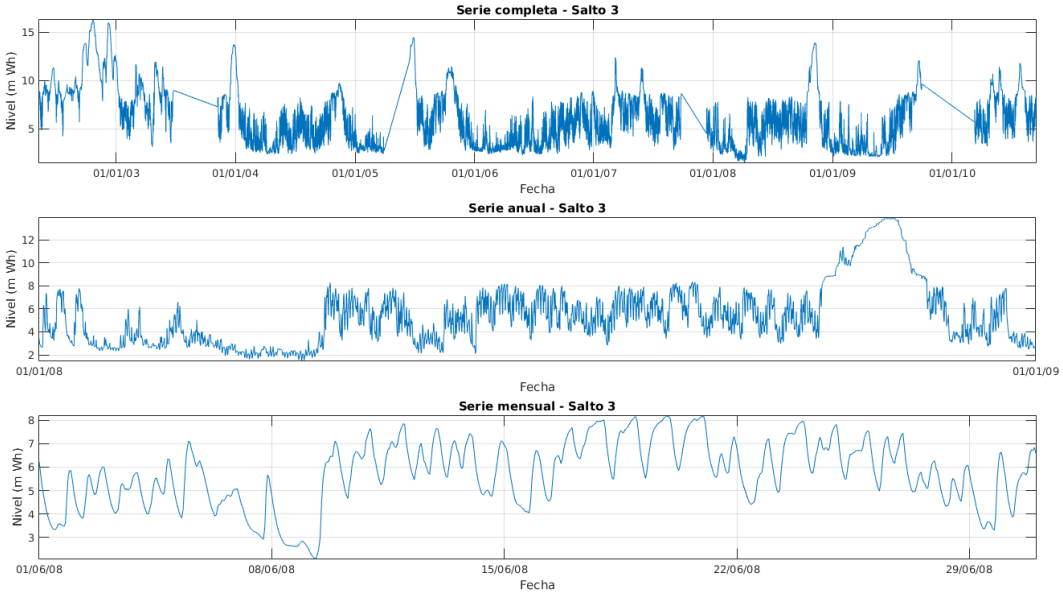


Figura 1.95: Series temporales - Salto 3.

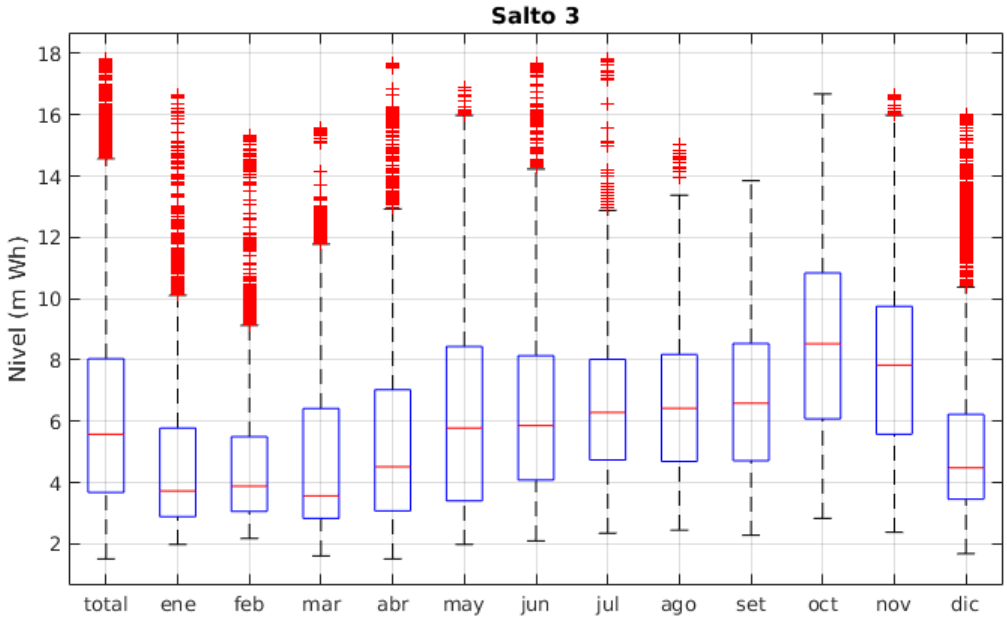
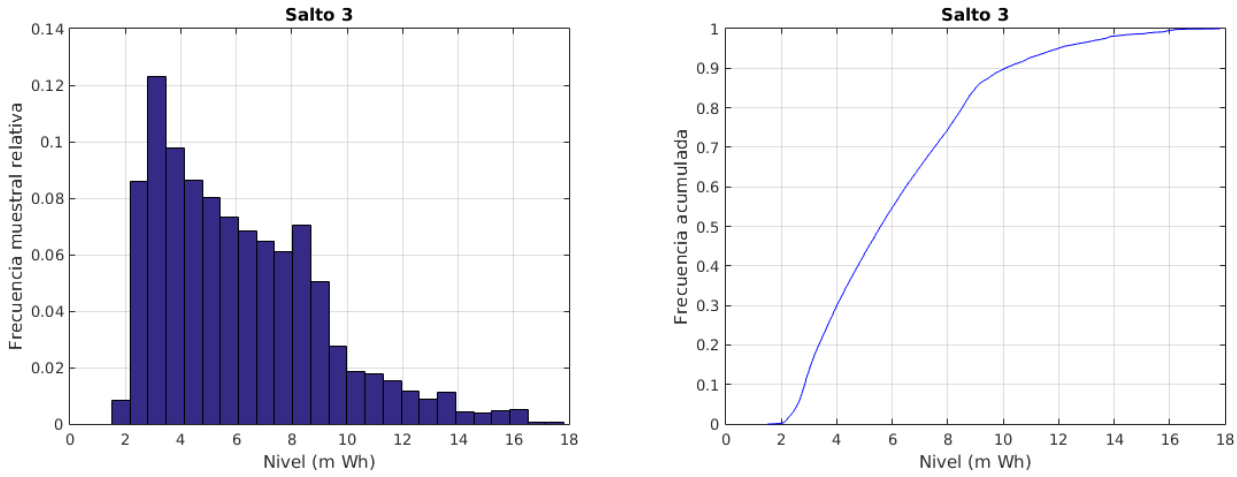


Figura 1.96: Boxplot - Salto 3.

1.5.6. Concordia 1

Esta serie tiene un nivel medio de 6,38 m PRH y una desviación estándar de 3,06 m. A continuación se presentan gráficos de la serie temporal, "boxplot" para la totalidad de la serie



(a) Histograma. **(b)** Frecuencia acumulada.

Figura 1.97: Salto 2

y para cada mes, histograma y frecuencia muestral relativa acumulada.

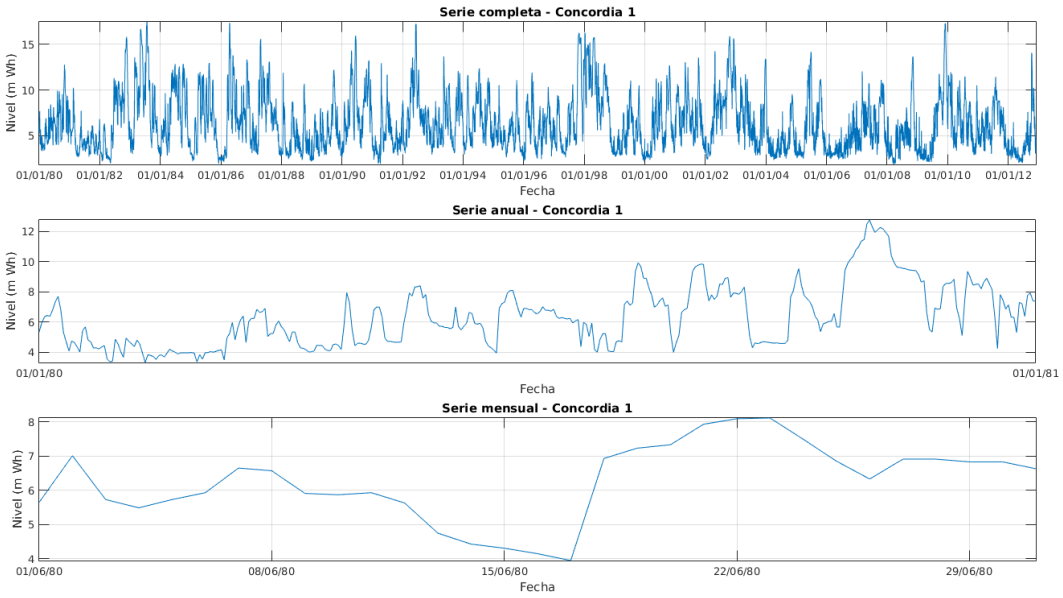
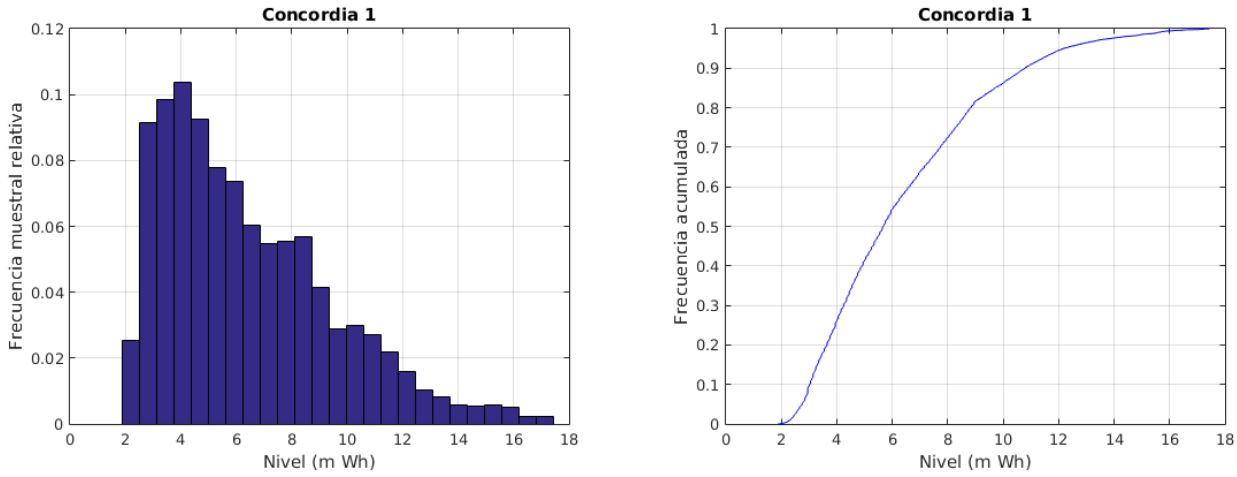


Figura 1.98: Series temporales - Concordia 1.



(a) Histograma. **(b)** Frecuencia acumulada.

Figura 1.100: Concordia 1

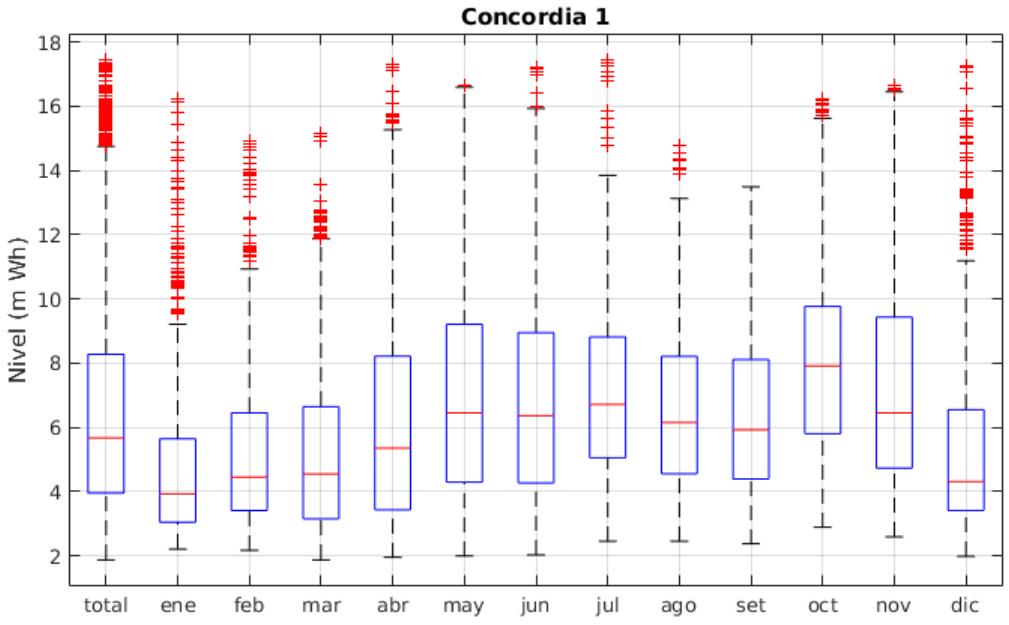


Figura 1.99: Boxplot - Concordia 1.

1.5.7. Concordia 2

Esta serie tiene un nivel medio de 7,52 m PRH y una desviación estándar de 2,31 m. A continuación se presentan gráficos de la serie temporal, "boxplot" para la totalidad de la serie y para cada mes, histograma y frecuencia muestral relativa acumulada.

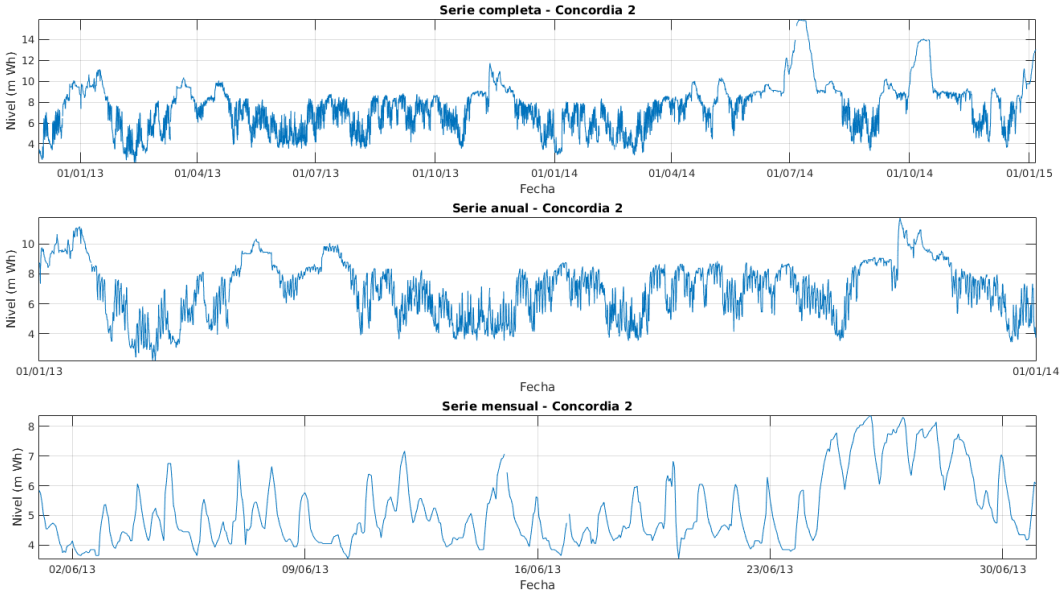


Figura 1.101: Series temporales - Concordia 2.

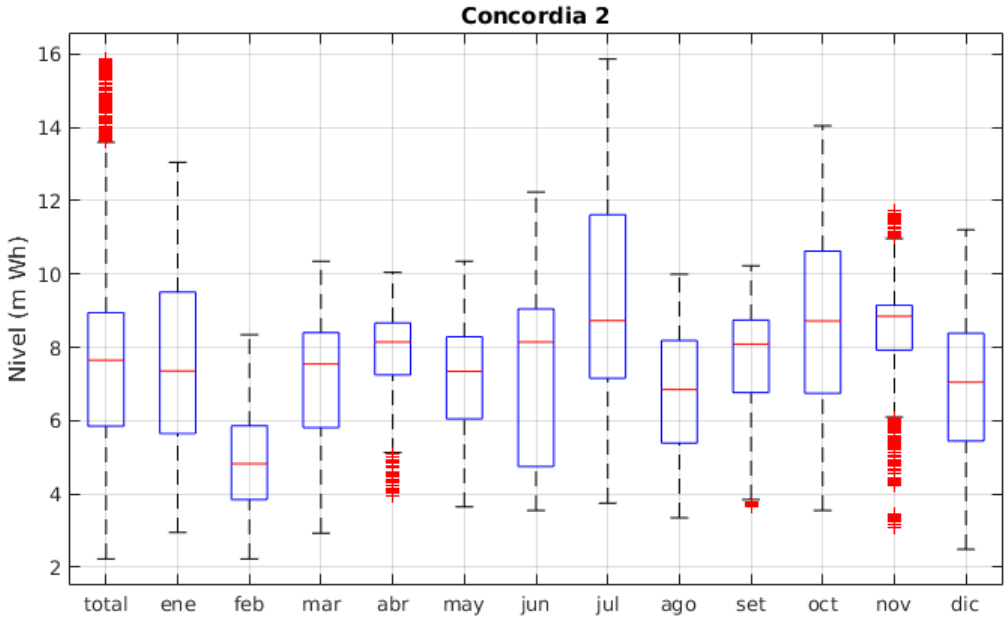
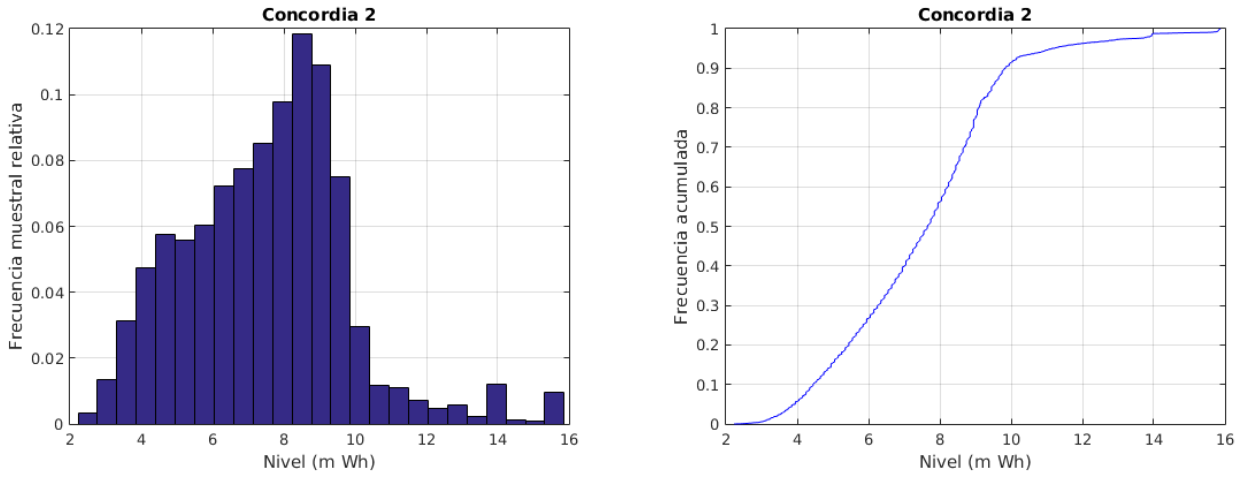


Figura 1.102: Boxplot - Concordia 2.

1.5.8. Yeruá

Esta serie, que cuenta en su totalidad con datos horarios, tiene un nivel medio de 5,51 m PRH y una desviación estándar de 2,75 m. A continuación se presentan gráficos de la serie



(a) Histograma. **(b)** Frecuencia acumulada.

Figura 1.103: Concordia 2

temporal, "boxplot" para la totalidad de la serie y para cada mes, histograma y frecuencia muestral relativa acumulada.

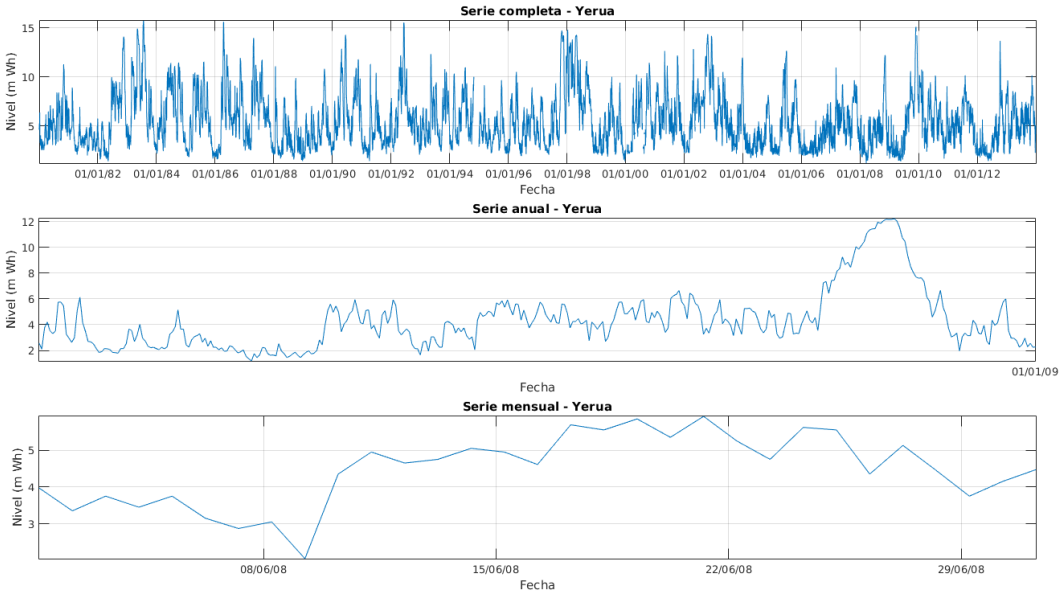
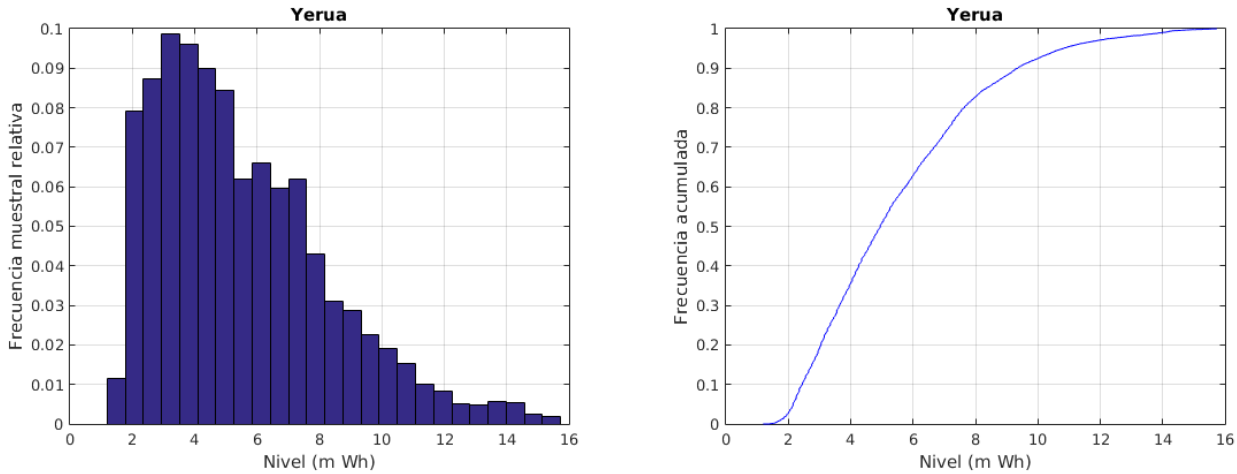


Figura 1.104: Series temporales - Yeruá.



(a) Histograma. **(b)** Frecuencia acumulada.

Figura 1.106: Yeruá

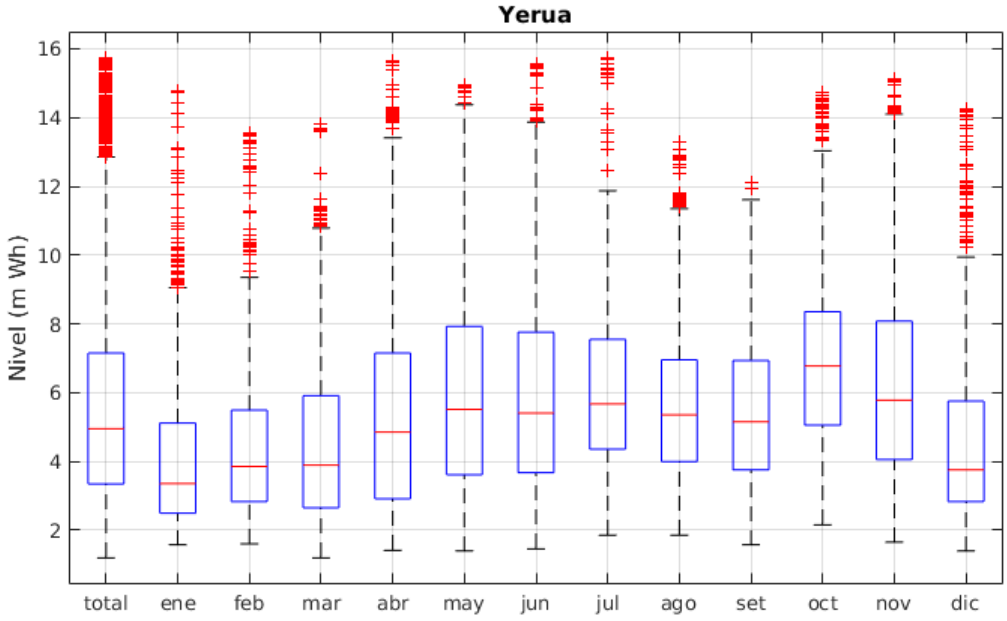


Figura 1.105: Boxplot - Yeruá.

1.5.9. Nueva Escocia

Esta serie, que cuenta en su totalidad con datos diarios, tiene un nivel medio de 5,13 m PRH y una desviación estándar de 2,52 m. A continuación se presentan gráficos de la serie temporal, "boxplot" para la totalidad de la serie y para cada mes, histograma y frecuencia muestral relativa acumulada.

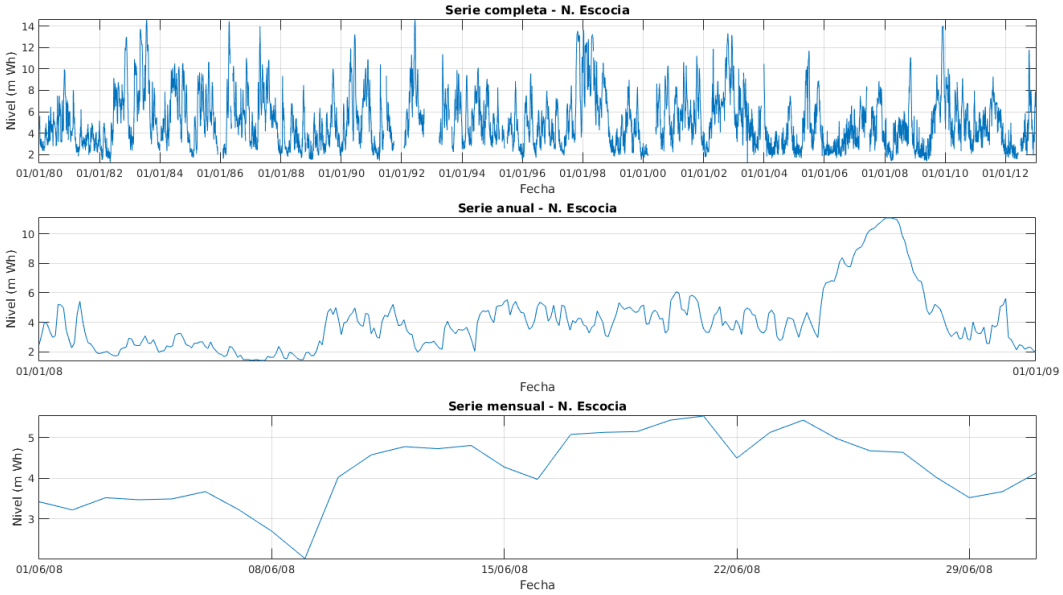


Figura 1.107: Series temporales - Nueva Escocia.

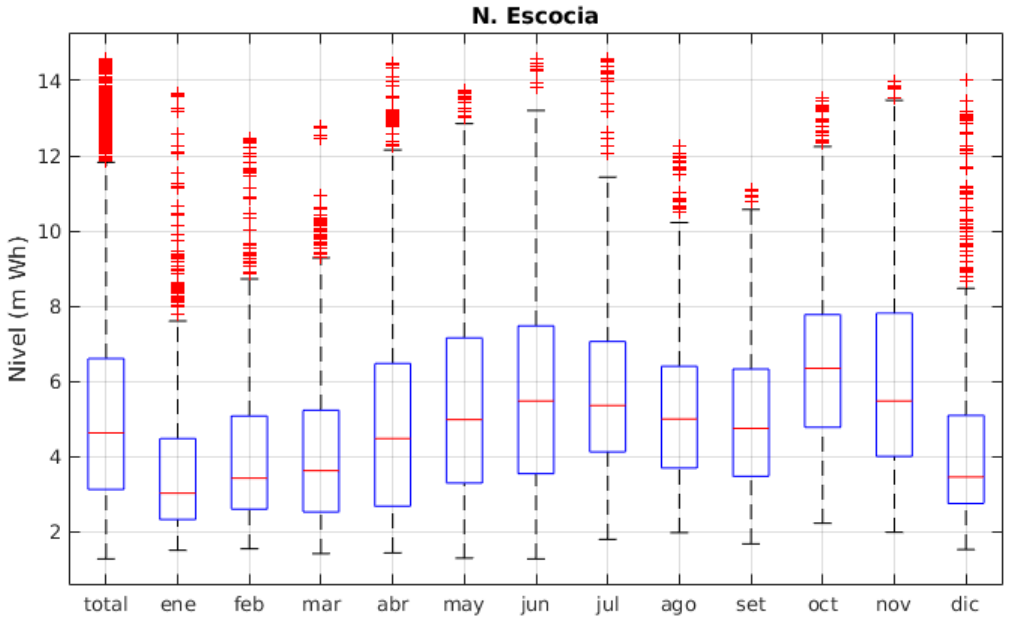
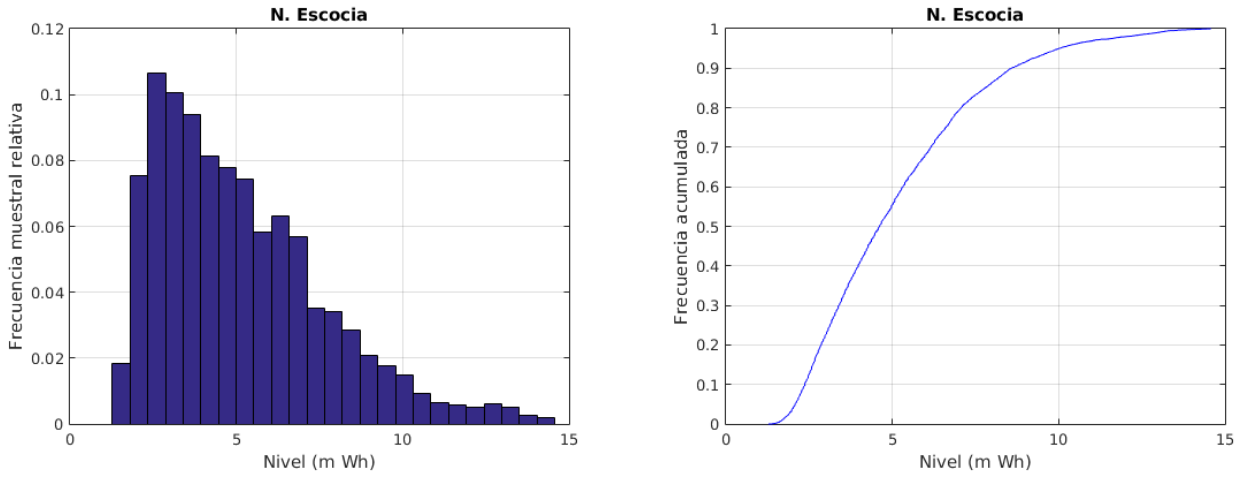


Figura 1.108: Boxplot - Nueva Escocia.

1.5.10. La Calera

Esta serie, que cuenta en su totalidad con datos diarios, tiene un nivel medio de 4,53 m PRH y una desviación estándar de 2,09 m. A continuación se presentan gráficos de la serie



(a) Histograma. **(b)** Frecuencia acumulada.

Figura 1.109: Nueva Escocia

temporal, "boxplot" para la totalidad de la serie y para cada mes, histograma y frecuencia muestral relativa acumulada.

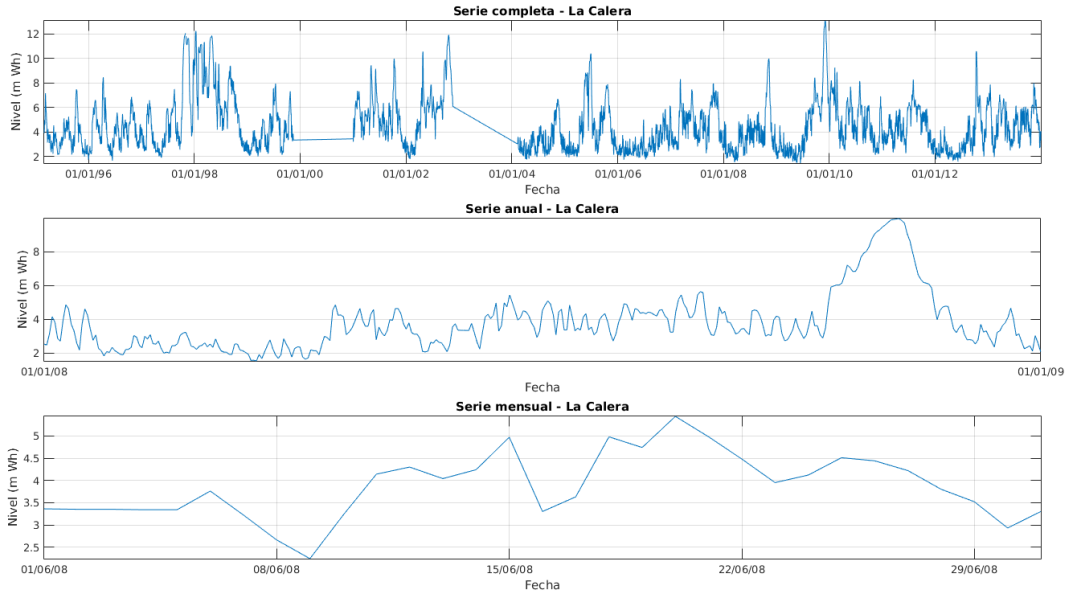
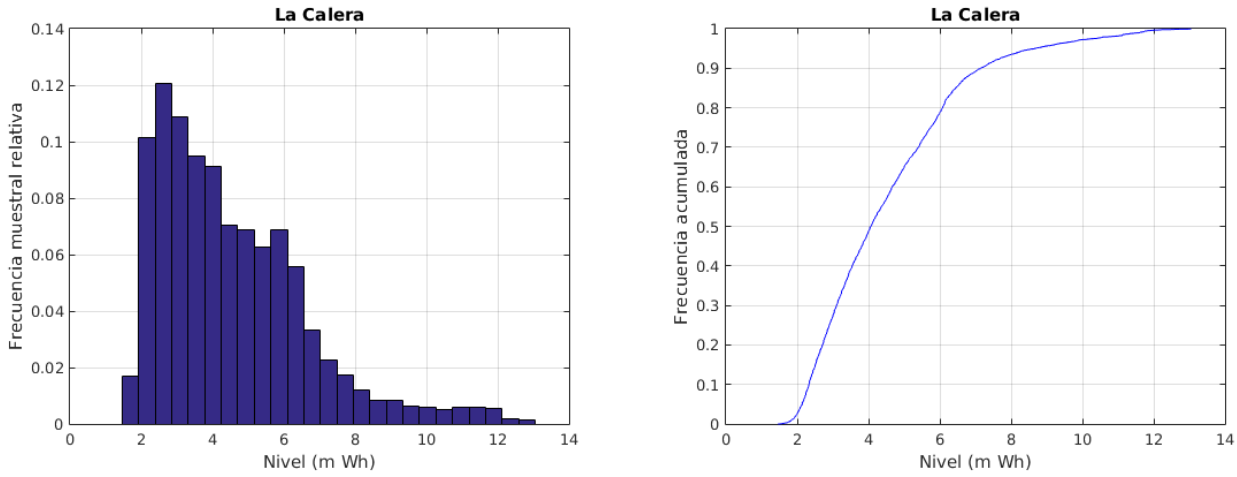


Figura 1.110: Series temporales - La Calera.



(a) Histograma. **(b)** Frecuencia acumulada.

Figura 1.112: La Calera

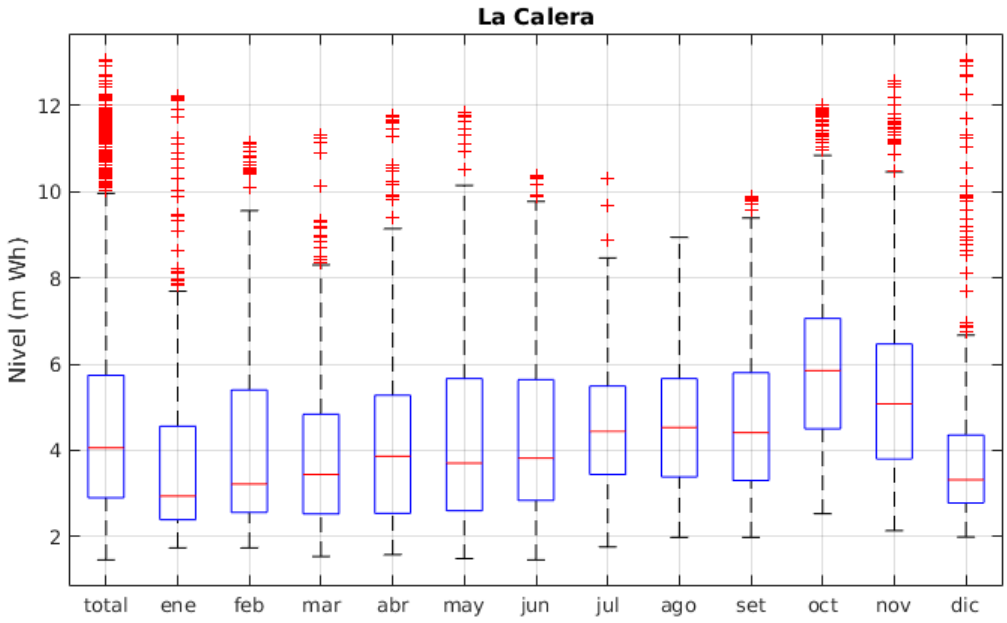


Figura 1.111: Boxplot - La Calera.

1.5.11. Fábrica Colón

Esta serie, que cuenta en su totalidad con datos diarios, tiene un nivel medio de 3,52 m PRH y una desviación estándar de 1,72 m. A continuación se presentan gráficos de la serie temporal, "boxplot" para la totalidad de la serie y para cada mes, histograma y frecuencia muestral relativa acumulada.

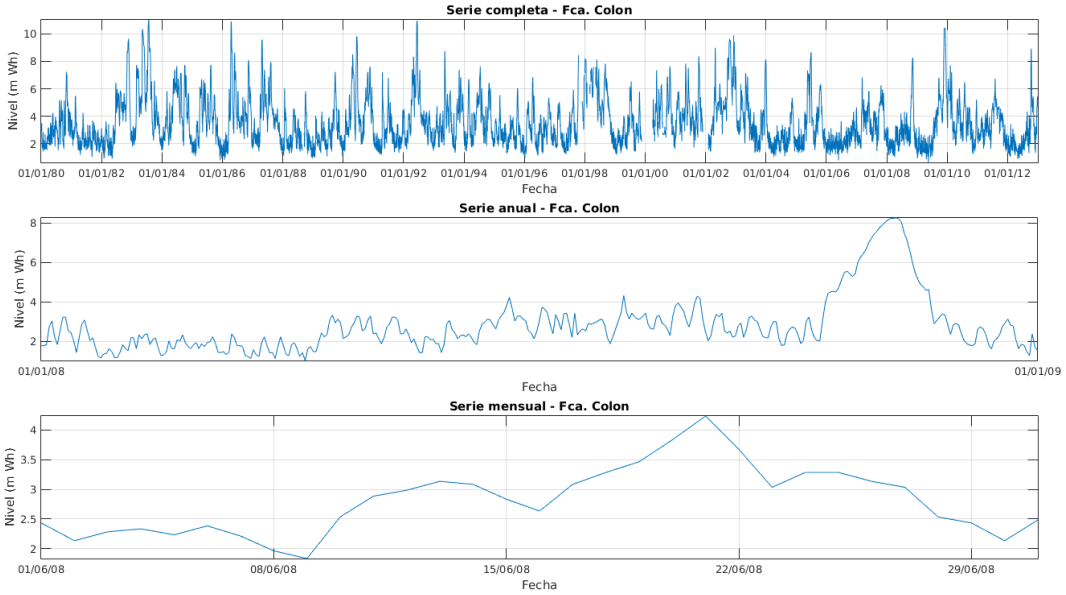


Figura 1.113: Series temporales - Fábrica Colón.

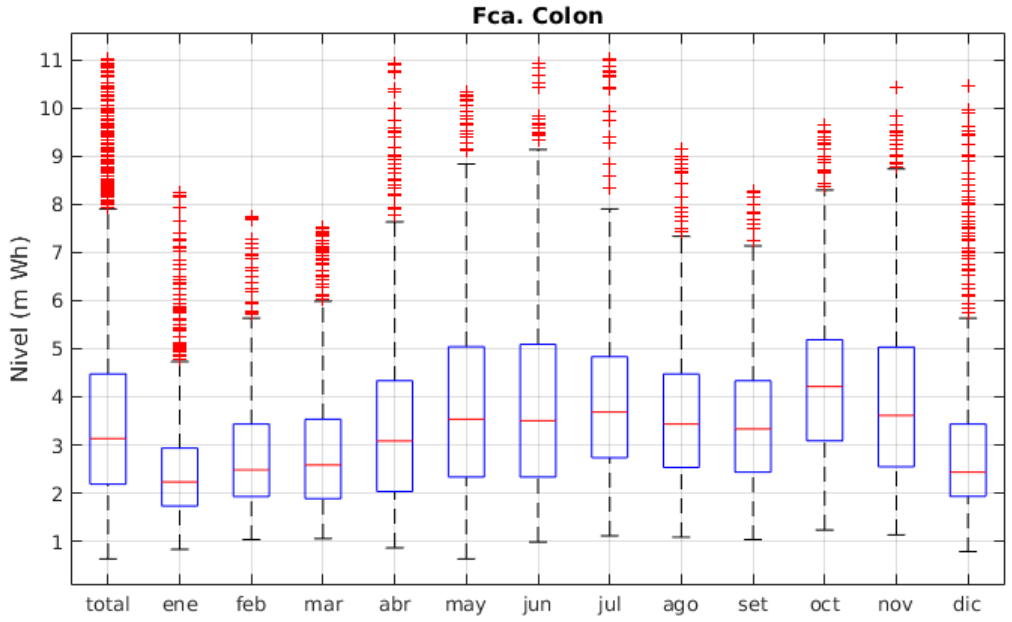
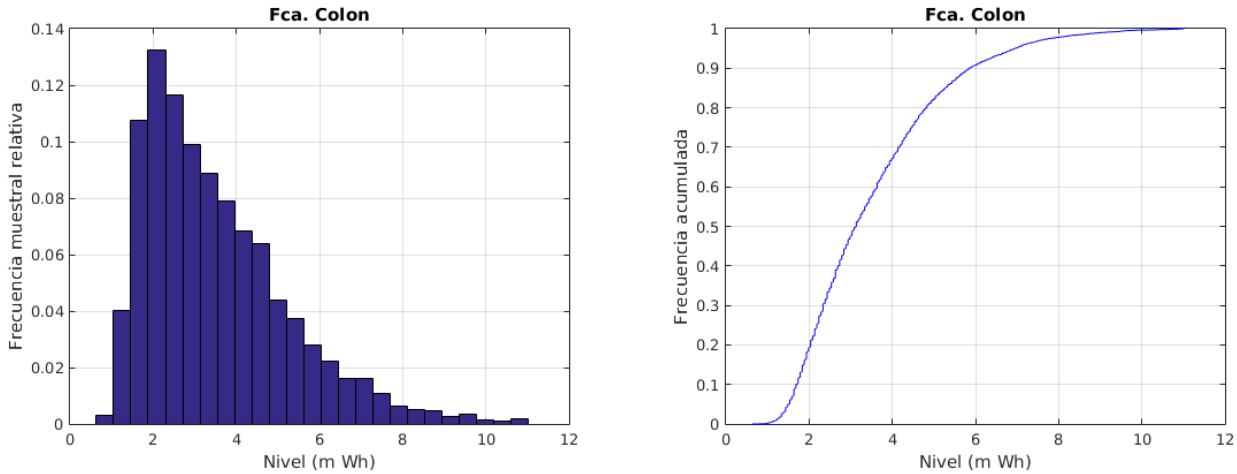


Figura 1.114: Boxplot - Fábrica Colón.

1.5.12. Colón 1

Esta serie tiene un nivel medio de 3,34 m PRH y una desviación estándar de 1,77 m. A continuación se presentan gráficos de la serie temporal, "boxplot" para la totalidad de la serie



(a) Histograma. **(b)** Frecuencia acumulada.

Figura 1.115: Fábrica Colón

y para cada mes, histograma y frecuencia muestral relativa acumulada.

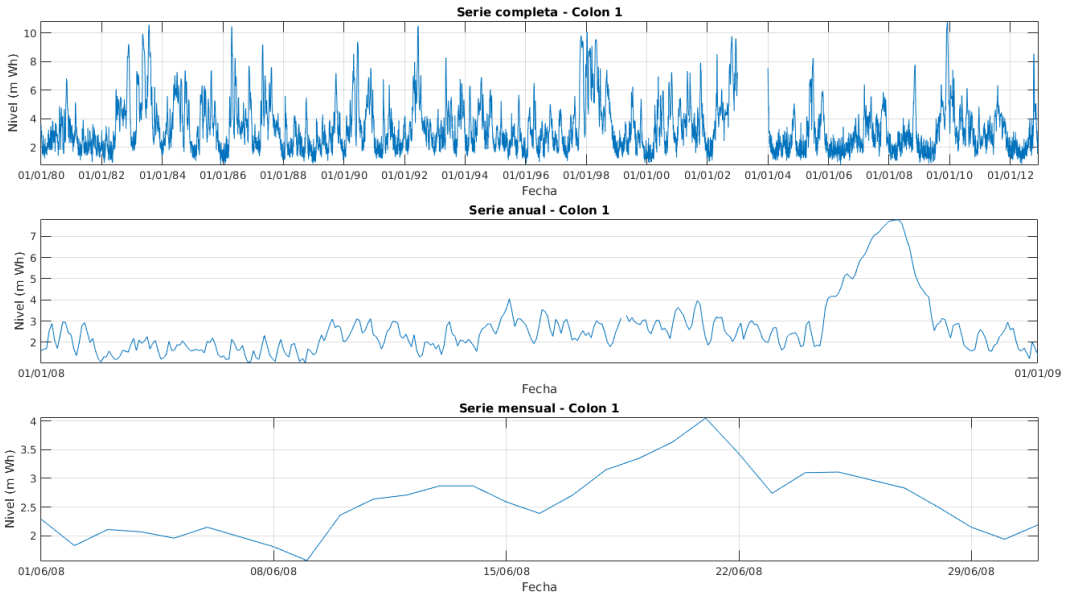
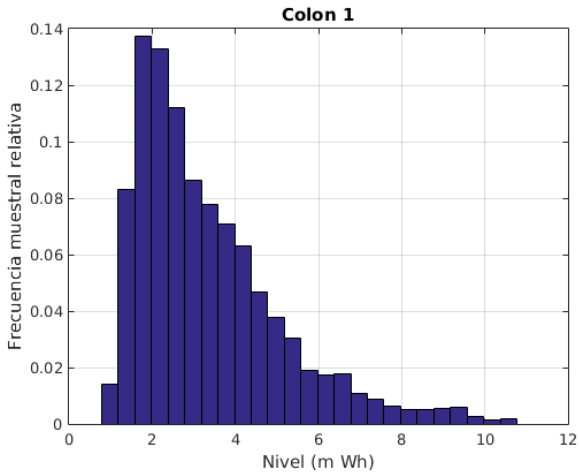
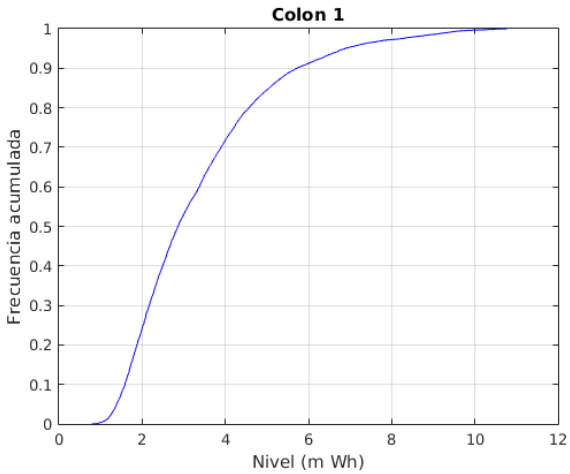


Figura 1.116: Series temporales - Colón 1.



(a) Histograma.



(b) Frecuencia acumulada.

Figura 1.118: Colón 1

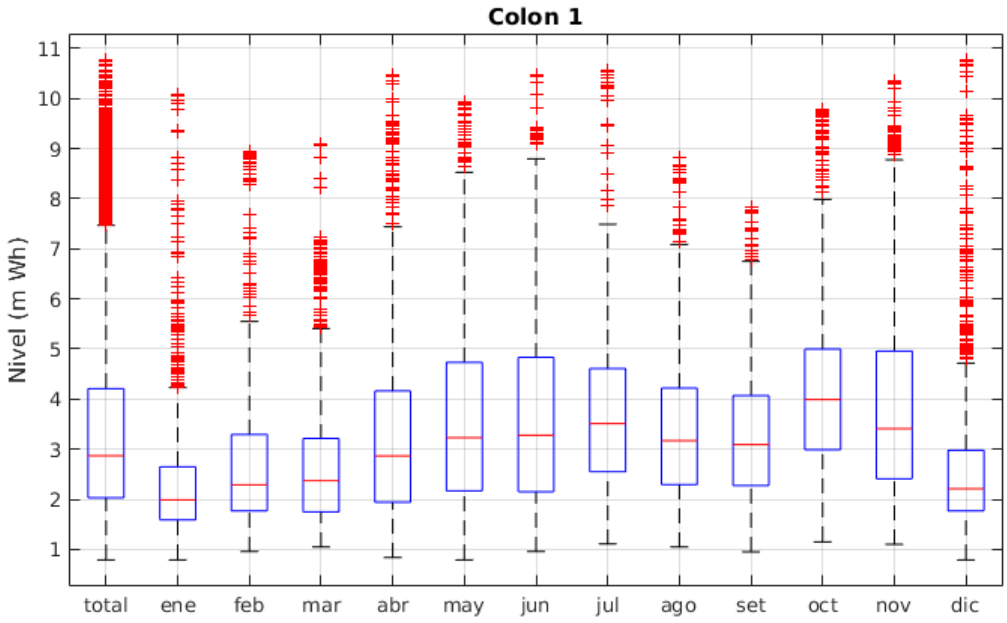


Figura 1.117: Boxplot - Colón 1.

1.5.13. Colón 2

Esta serie tiene un nivel medio de 3,76 m PRH y una desviación estándar de 1,48 m. A continuación se presentan gráficos de la serie temporal, "boxplot" para la totalidad de la serie y para cada mes, histograma y frecuencia muestral relativa acumulada.

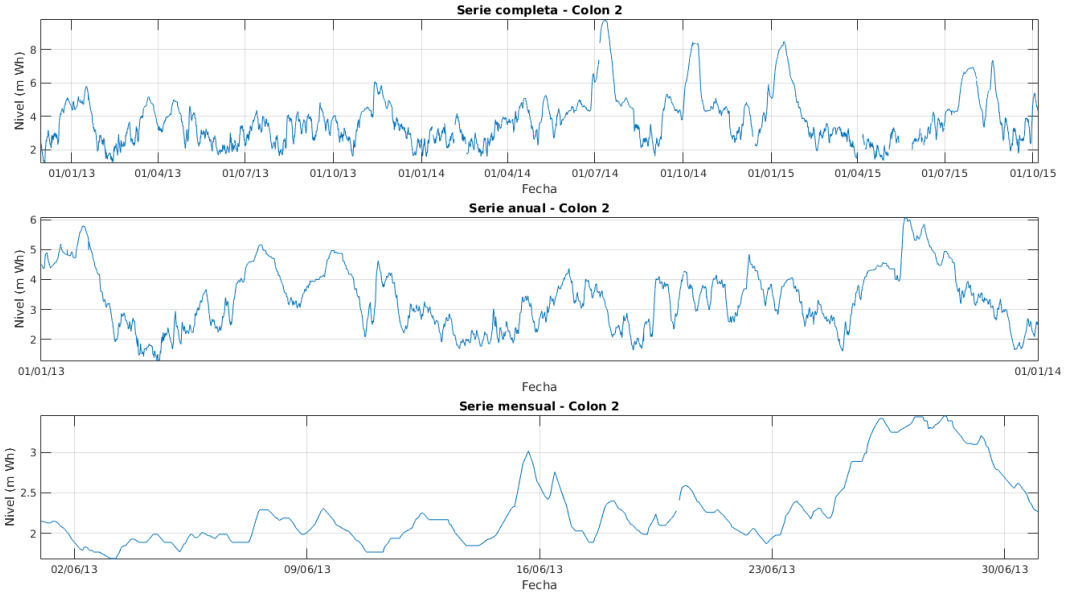


Figura 1.119: Series temporales - Colón 2.

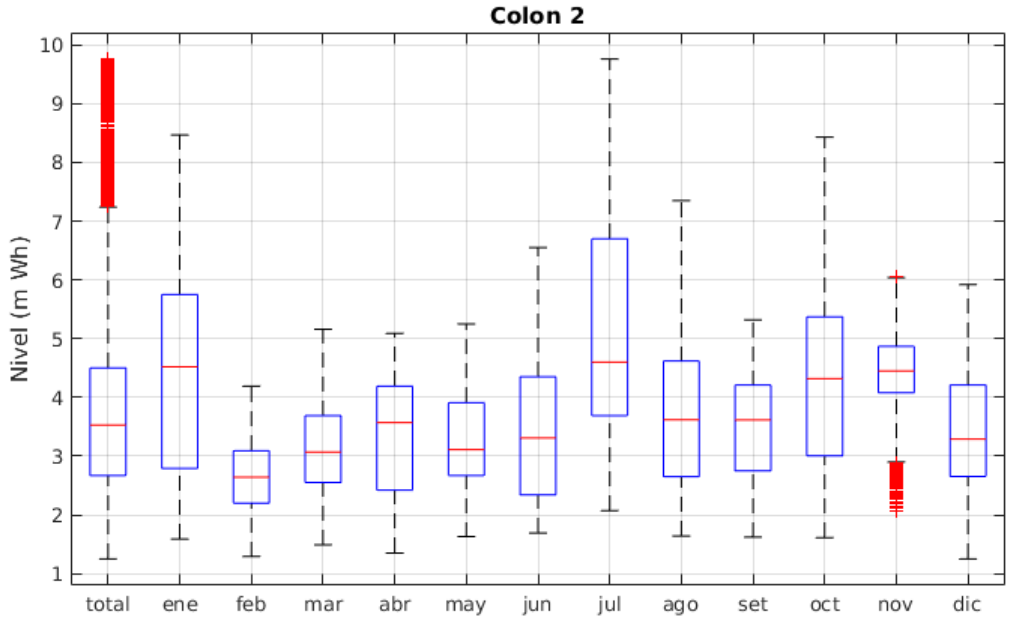
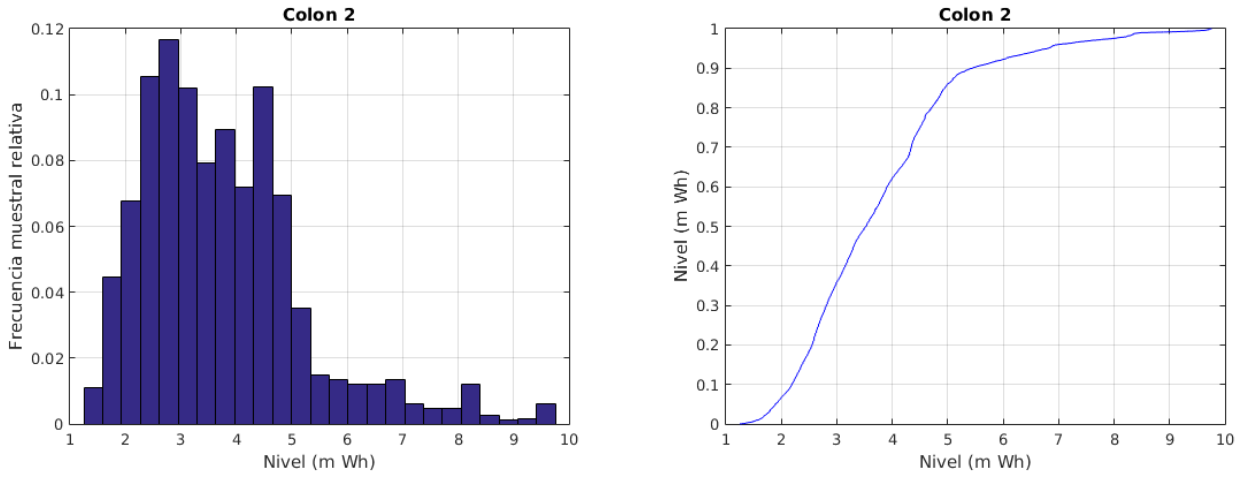


Figura 1.120: Boxplot - Colón 2.

1.5.14. Paysandú 1 y 3

Esta serie tiene un nivel medio de 3,20 m PRH y una desviación estándar de 1,55 m. A continuación se presentan gráficos de la serie temporal, "boxplot" para la totalidad de la serie



(a) Histograma. **(b)** Frecuencia acumulada.

Figura 1.121: Colón 2

y para cada mes, histograma y frecuencia muestral relativa acumulada.

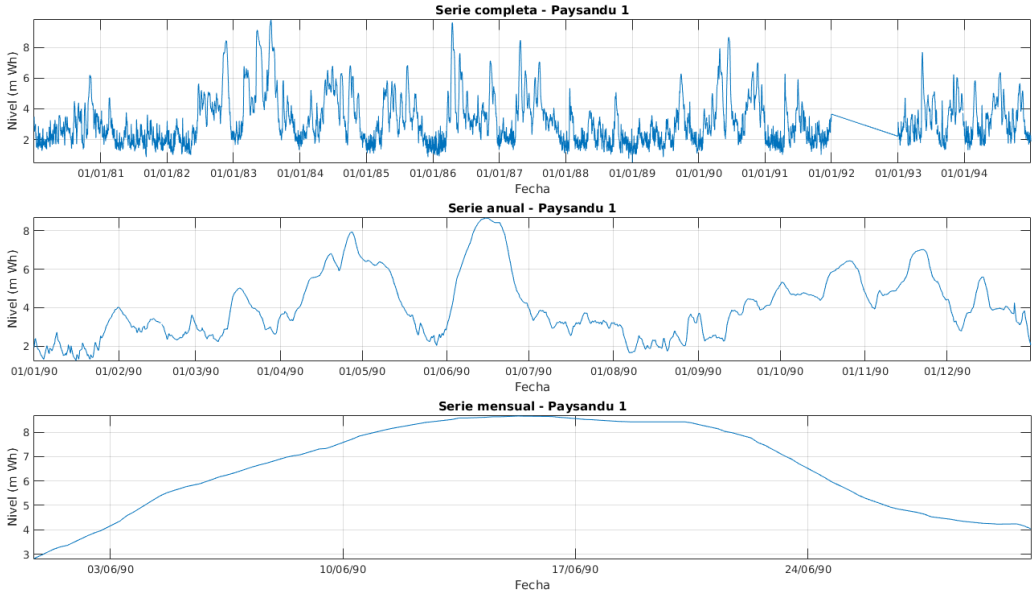
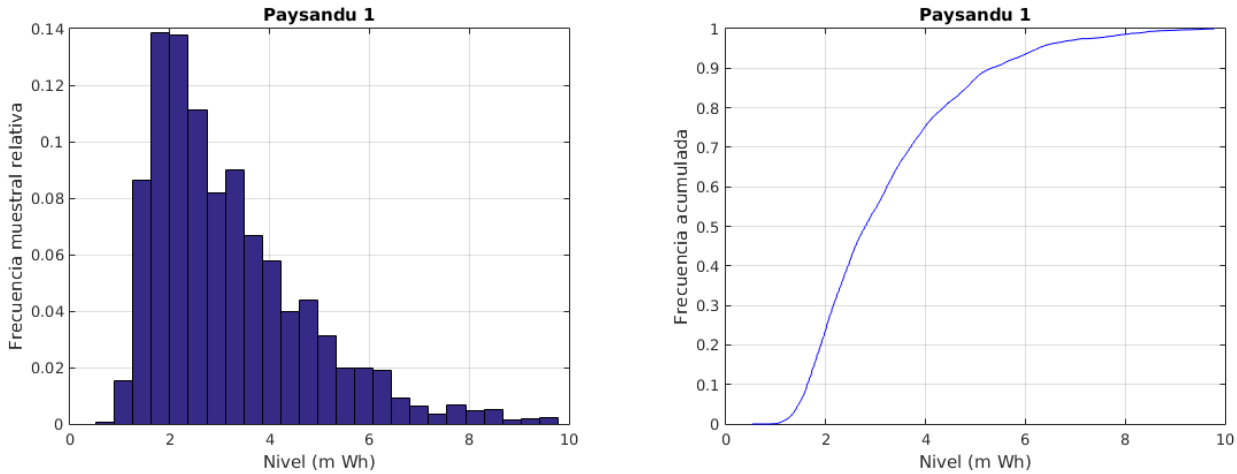


Figura 1.122: Series temporales - Paysandú 1 y 3.



(a) Histograma. **(b)** Frecuencia acumulada.

Figura 1.124: Paysandú 1 y 3

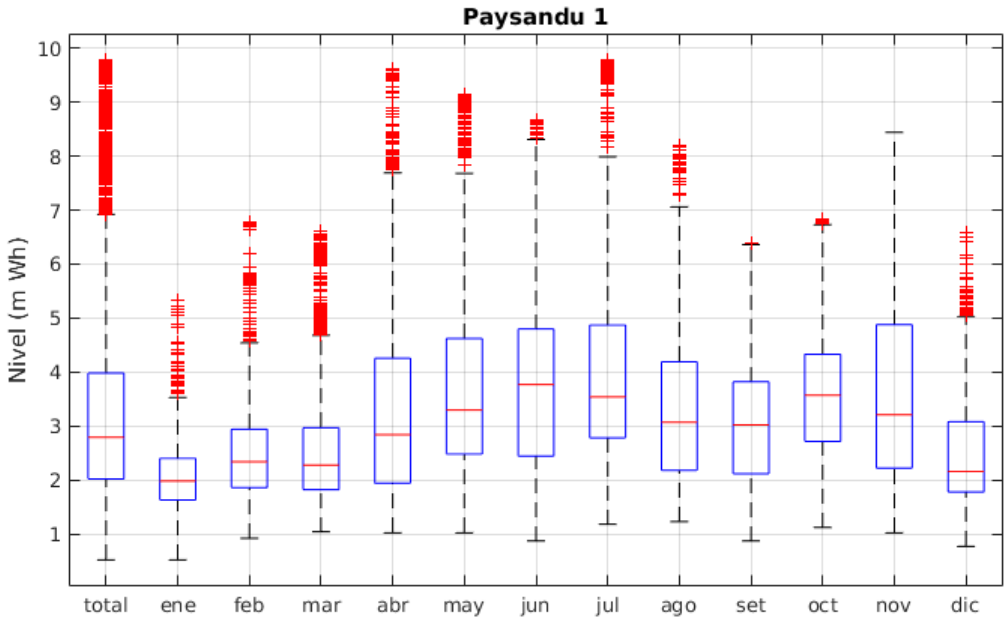


Figura 1.123: Boxplot - Paysandú 1 y 3.

1.5.15. Paysandú 2 y 4

Esta serie tiene un nivel medio de 3,22 m PRH y una desviación estándar de 1,66 m. A continuación se presentan gráficos de la serie temporal, "boxplot" para la totalidad de la serie y para cada mes, histograma y frecuencia muestral relativa acumulada.

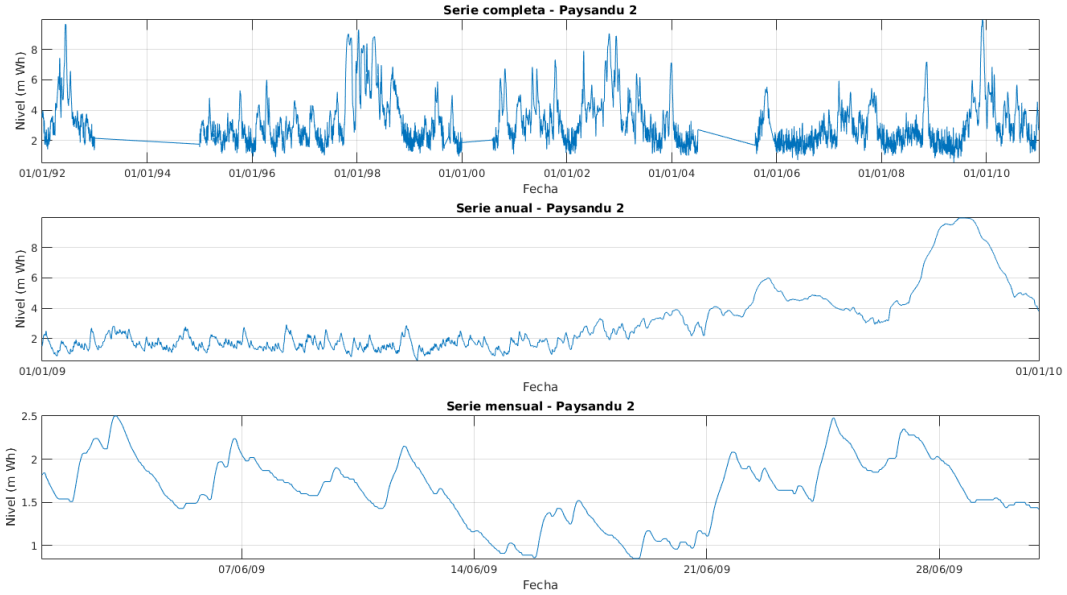


Figura 1.125: Series temporales - Paysandú 2 y 4.

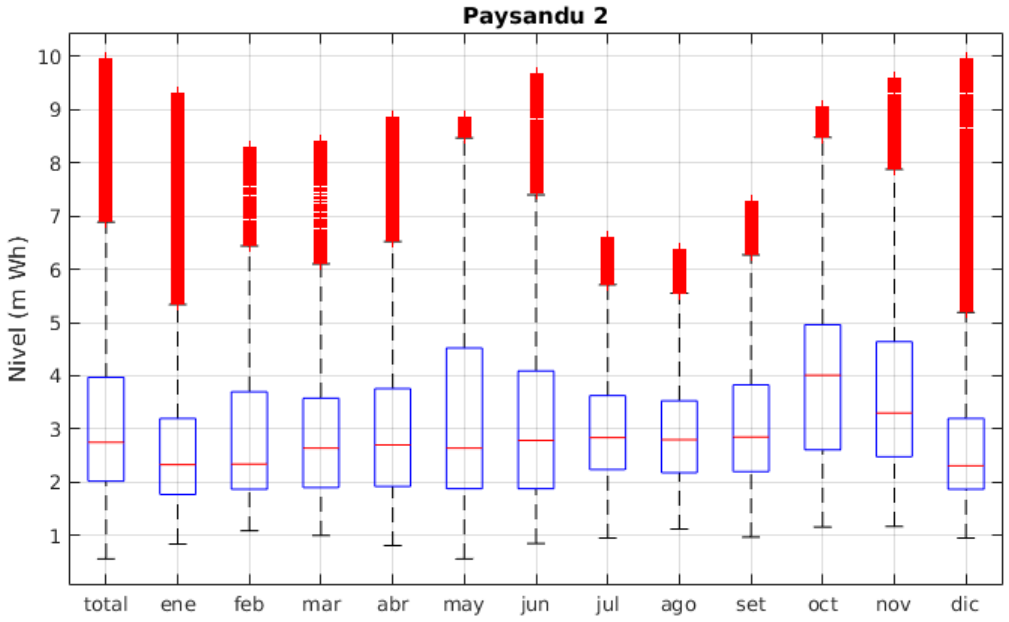
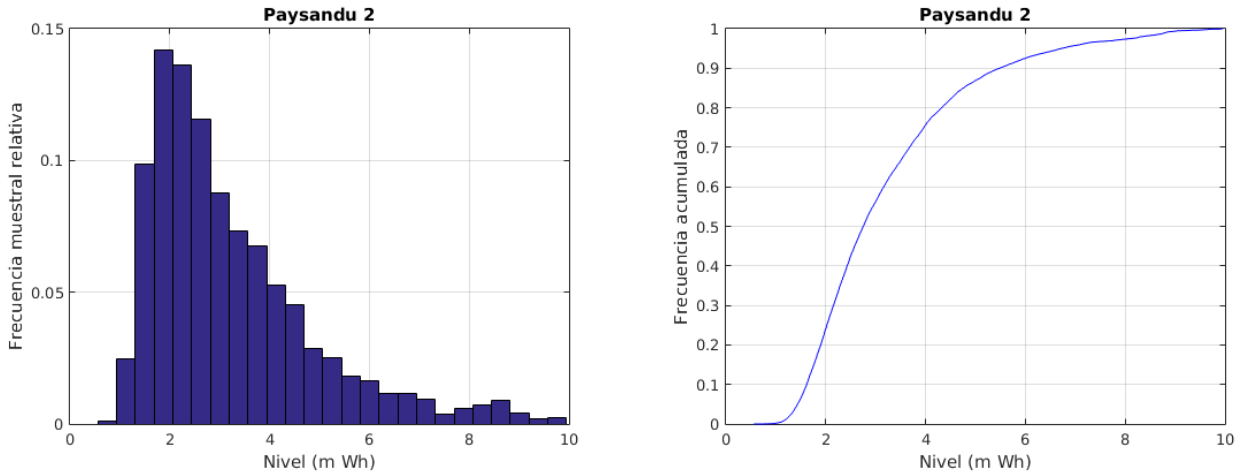


Figura 1.126: Boxplot - Paysandú 2 y 4.

1.5.16. Paysandú 5

Esta serie tiene un nivel medio de 2,77 m PRH y una desviación estándar de 1,09 m. A continuación se presentan gráficos de la serie temporal, "boxplot" para la totalidad de la serie



(a) Histograma. **(b)** Frecuencia acumulada.

Figura 1.127: Paysandú 2 y 4

y para cada mes, histograma y frecuencia muestral relativa acumulada.

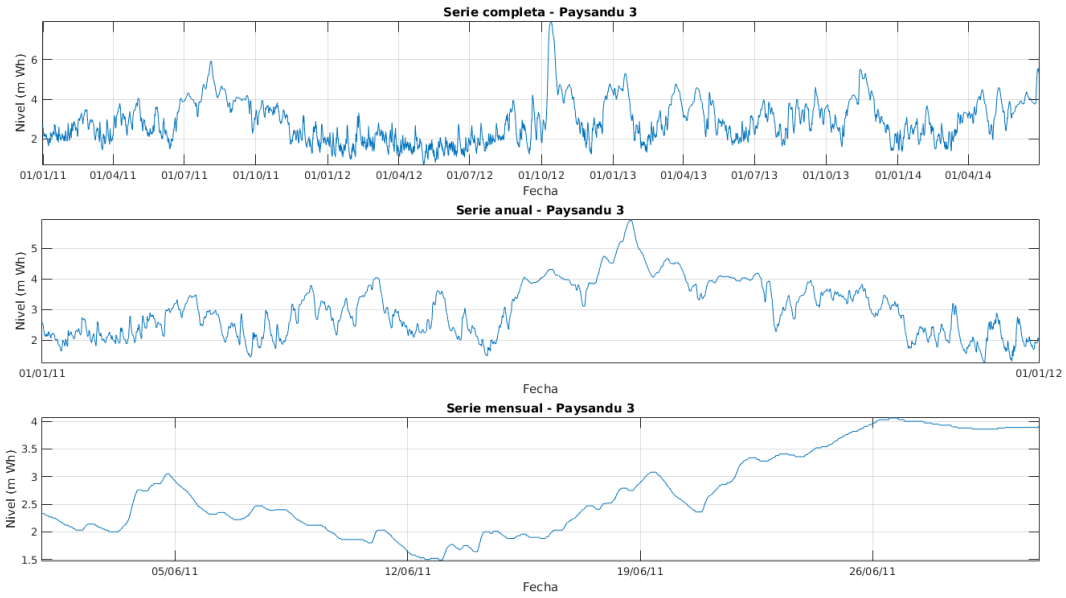
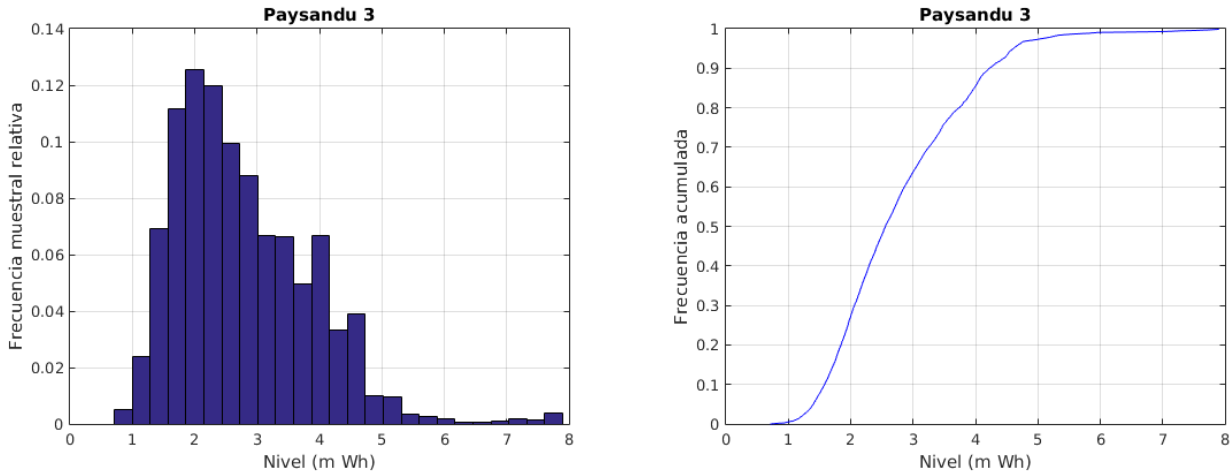


Figura 1.128: Series temporales - Paysandú 5.



(a) Histograma. **(b)** Frecuencia acumulada.

Figura 1.130: Paysandú 5

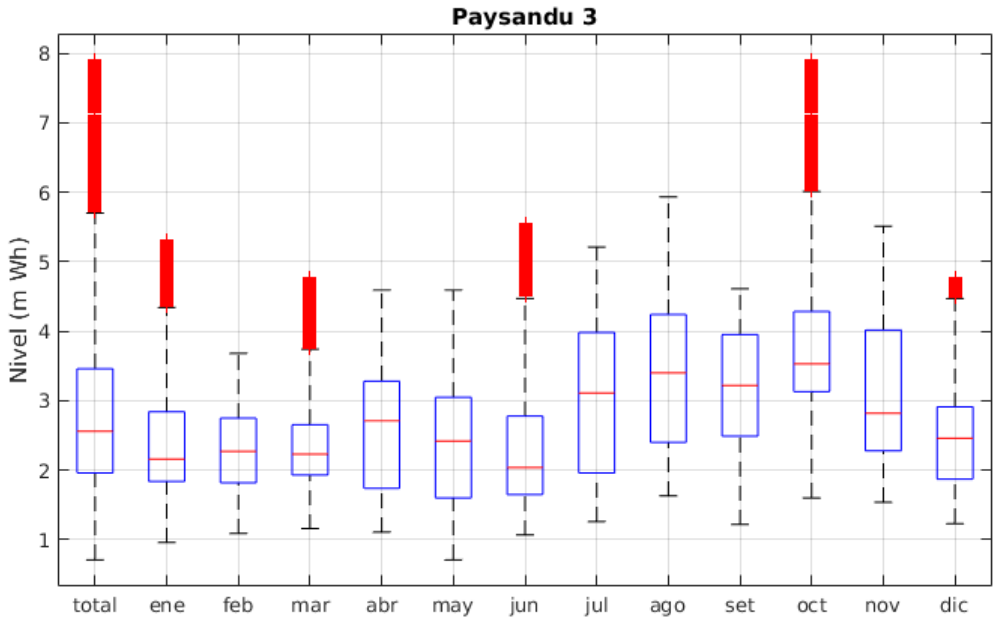


Figura 1.129: Boxplot - Paysandú 5.

1.5.17. Concepción del Uruguay 1

Esta serie tiene un nivel medio de 2,96 m PRH y una desviación estándar de 1,38 m. A continuación se presentan gráficos de la serie temporal, "boxplot" para la totalidad de la serie y para cada mes, histograma y frecuencia muestral relativa acumulada.

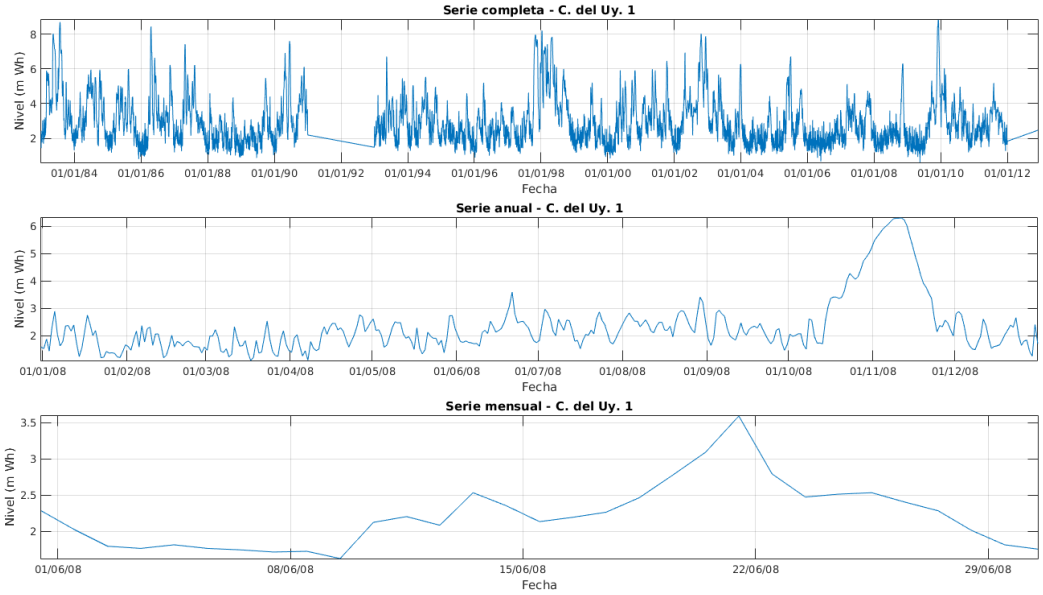


Figura 1.131: Series temporales - Concepción del Uruguay 1.

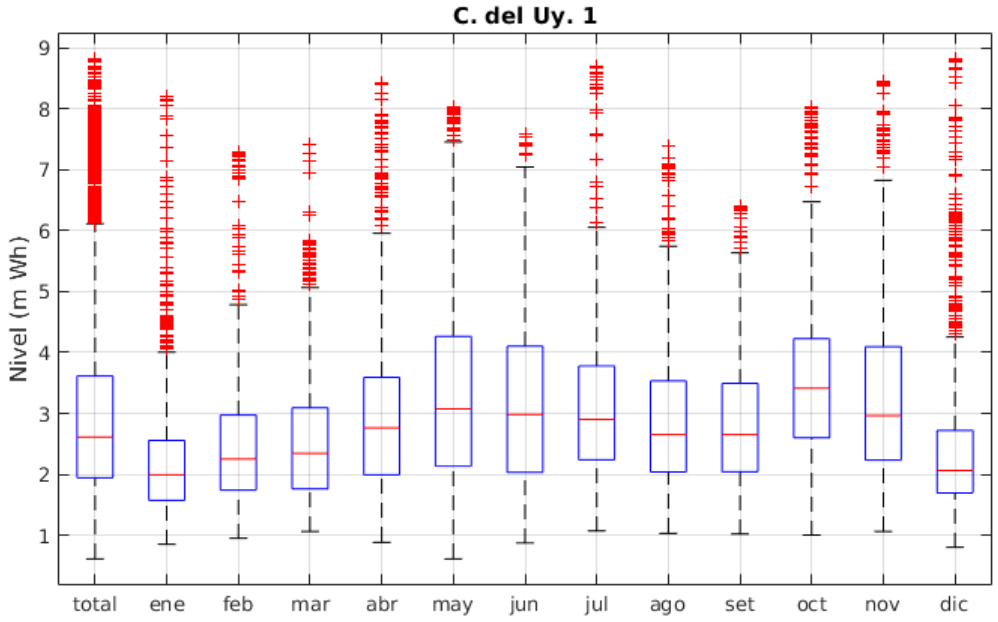
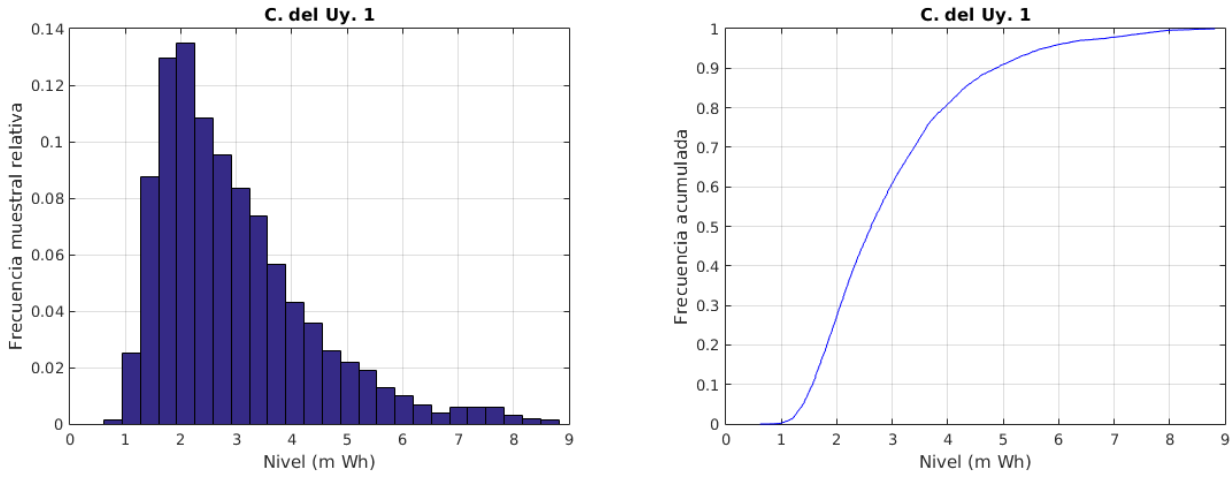


Figura 1.132: Boxplot - Concepción del Uruguay 1.

1.5.18. Concepción del Uruguay 2

Esta serie tiene un nivel medio de 3,31 m PRH y una desviación estándar de 1,15 m. A continuación se presentan gráficos de la serie temporal, "boxplot" para la totalidad de la serie



(a) Histograma. **(b)** Frecuencia acumulada.

Figura 1.133: Concepción del Uruguay 1

y para cada mes, histograma y frecuencia muestral relativa acumulada.

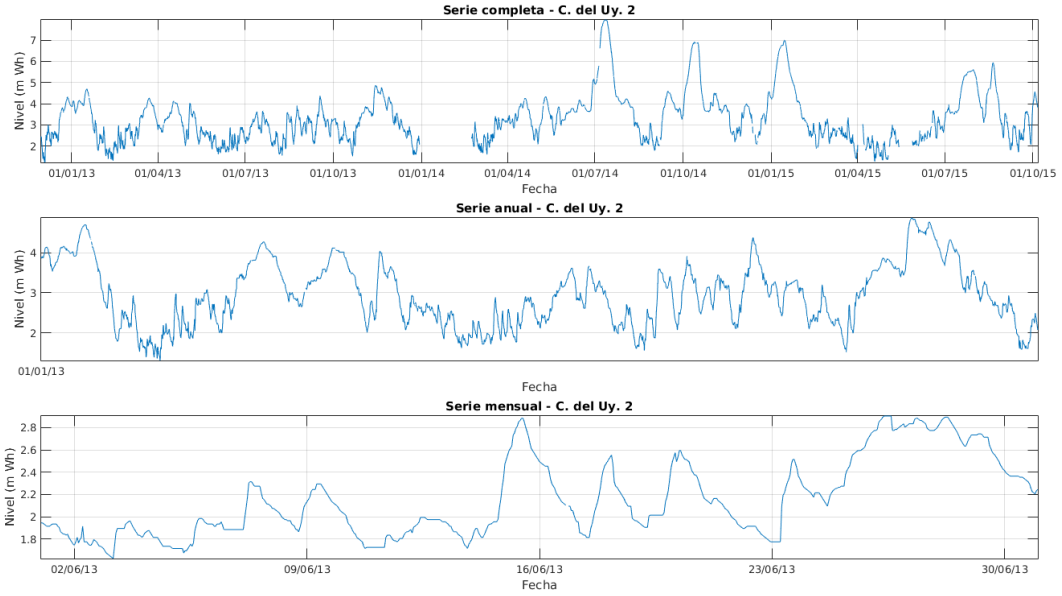
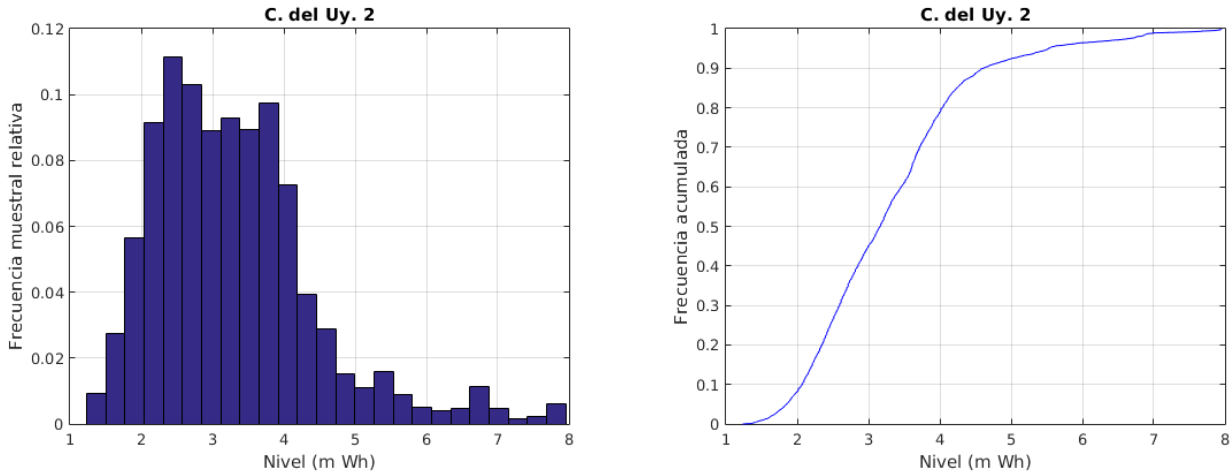


Figura 1.134: Series temporales - Concepción del Uruguay 2.



(a) Histograma. **(b)** Frecuencia acumulada.

Figura 1.136: Concepción del Uruguay 2

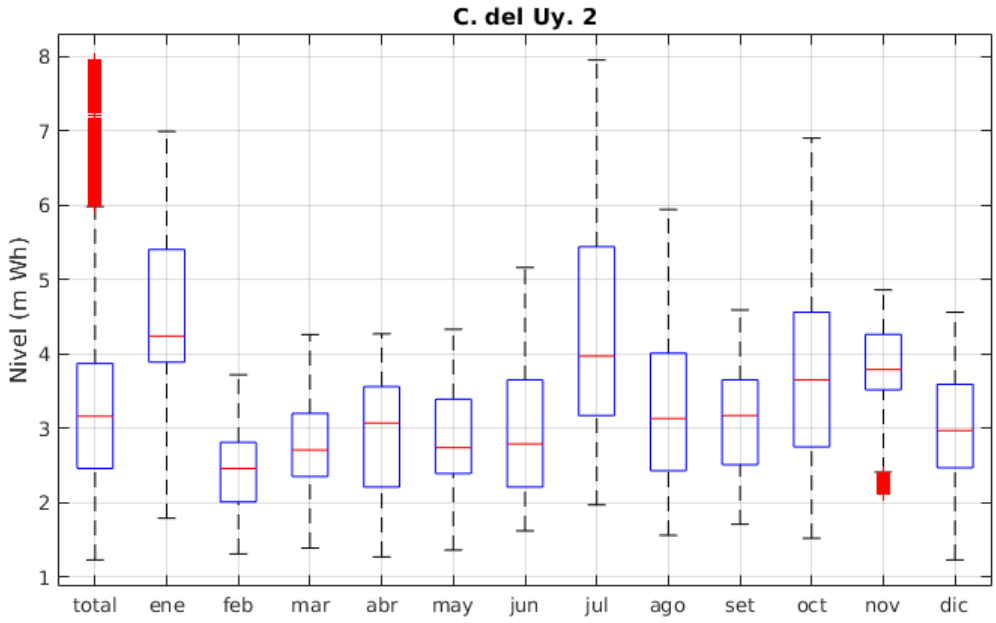


Figura 1.135: Boxplot - Concepción del Uruguay 2.

1.5.19. Campichuelo

Esta serie, que cuenta en su totalidad con datos diarios, tiene un nivel medio de 2,62 m PRH y una desviación estándar de 1,07 m. A continuación se presentan gráficos de la serie temporal, "boxplot" para la totalidad de la serie y para cada mes, histograma y frecuencia muestral relativa acumulada.

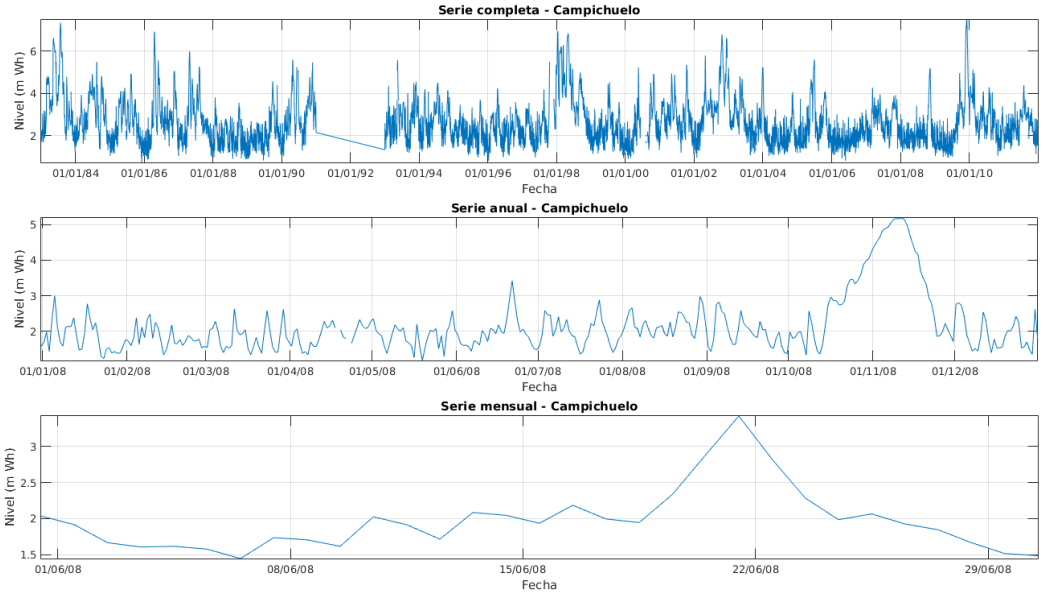


Figura 1.137: Series temporales - Campichuelo.

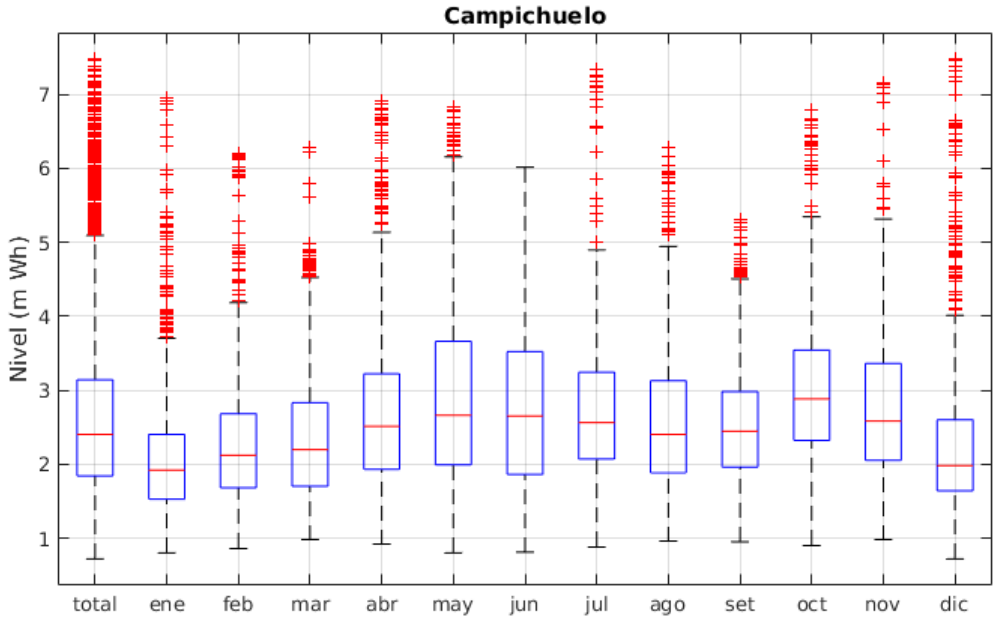
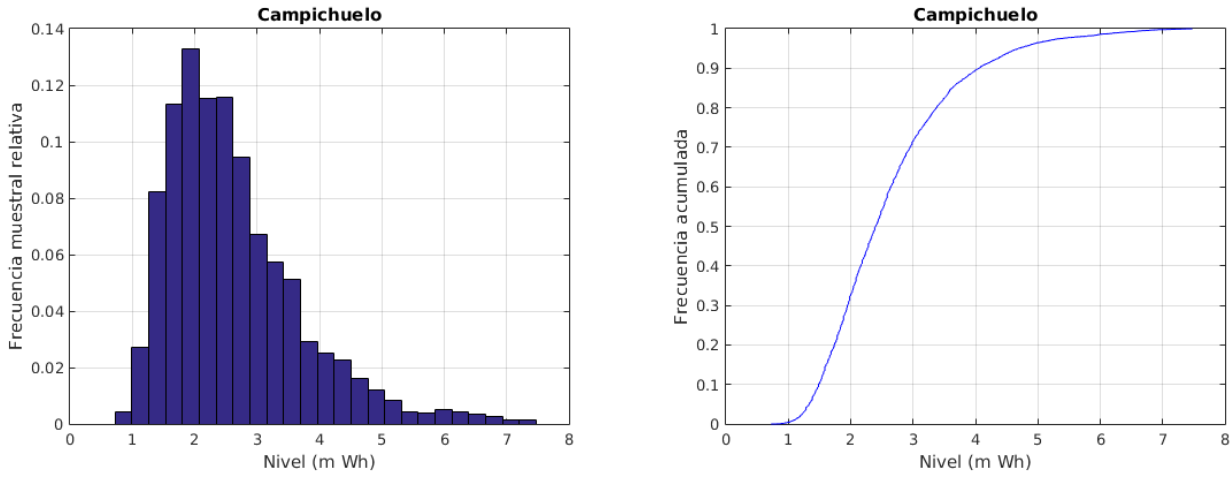


Figura 1.138: Boxplot - Campichuelo.

1.5.20. Gualeguaychú

Esta serie, que cuenta en su totalidad con datos diarios, tiene un nivel medio de 2,12 m PRH y una desviación estándar de 0,66 m. A continuación se presentan gráficos de la serie



(a) Histograma. **(b)** Frecuencia acumulada.

Figura 1.139: Campichuelo

temporal, "boxplot" para la totalidad de la serie y para cada mes, histograma y frecuencia muestral relativa acumulada.

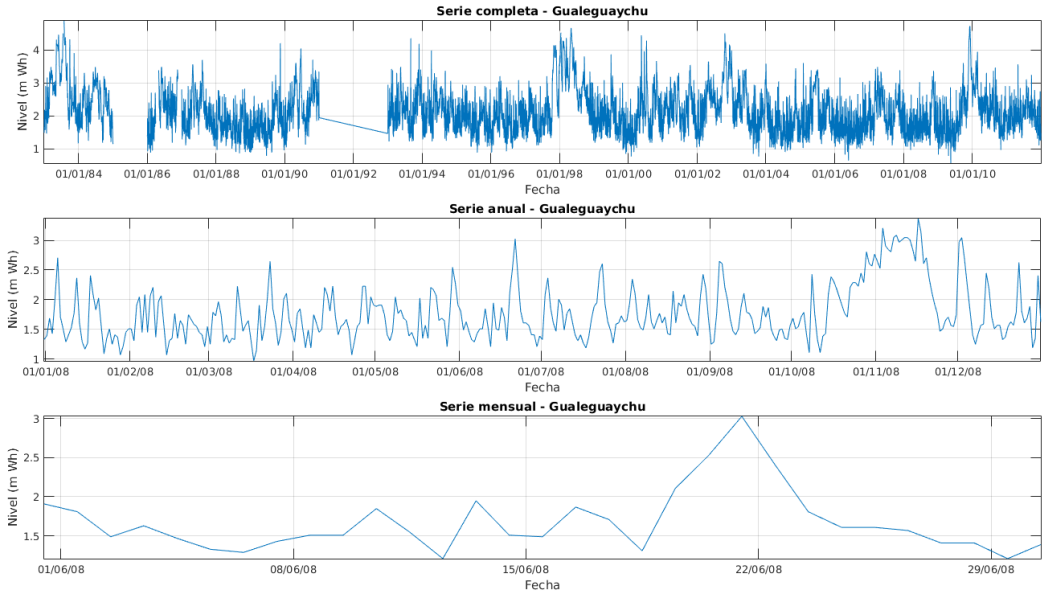
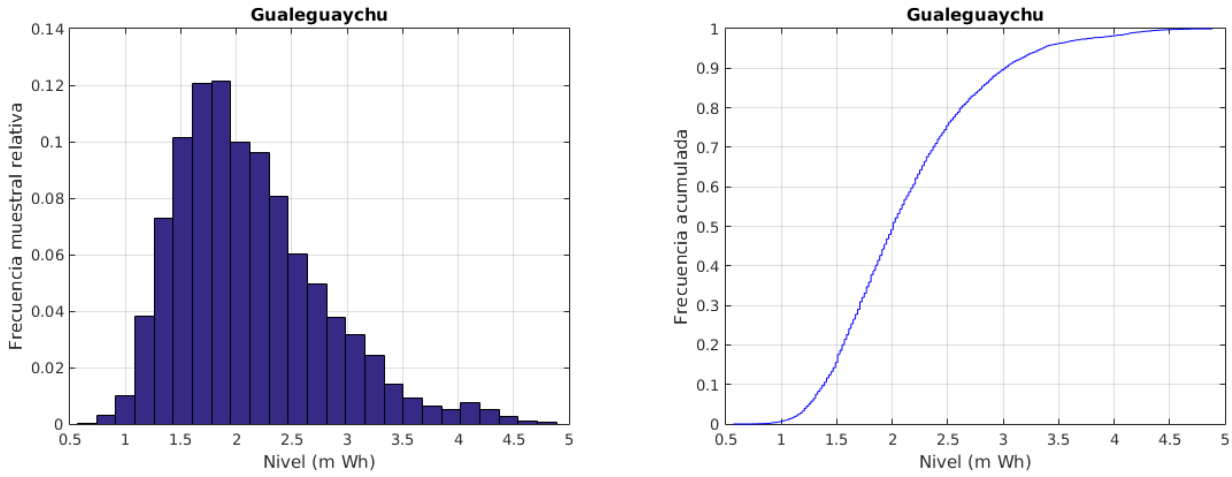


Figura 1.140: Series temporales - Gualeguaychú.



(a) Histograma. **(b)** Frecuencia acumulada.

Figura 1.142: Gualeguaychú

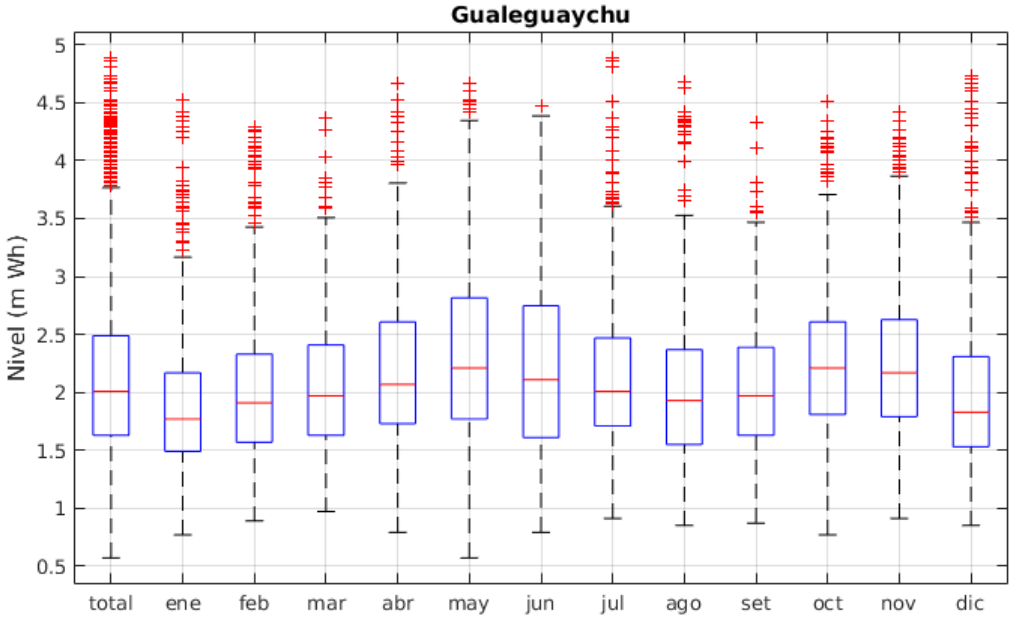


Figura 1.141: Boxplot - Gualeguaychú.

1.5.21. Fray Bentos 1 y 3

Esta serie tiene un nivel medio de 2,38 m PRH y una desviación estándar de 0,71 m. A continuación se presentan gráficos de la serie temporal, "boxplot" para la totalidad de la serie y para cada mes, histograma y frecuencia muestral relativa acumulada.

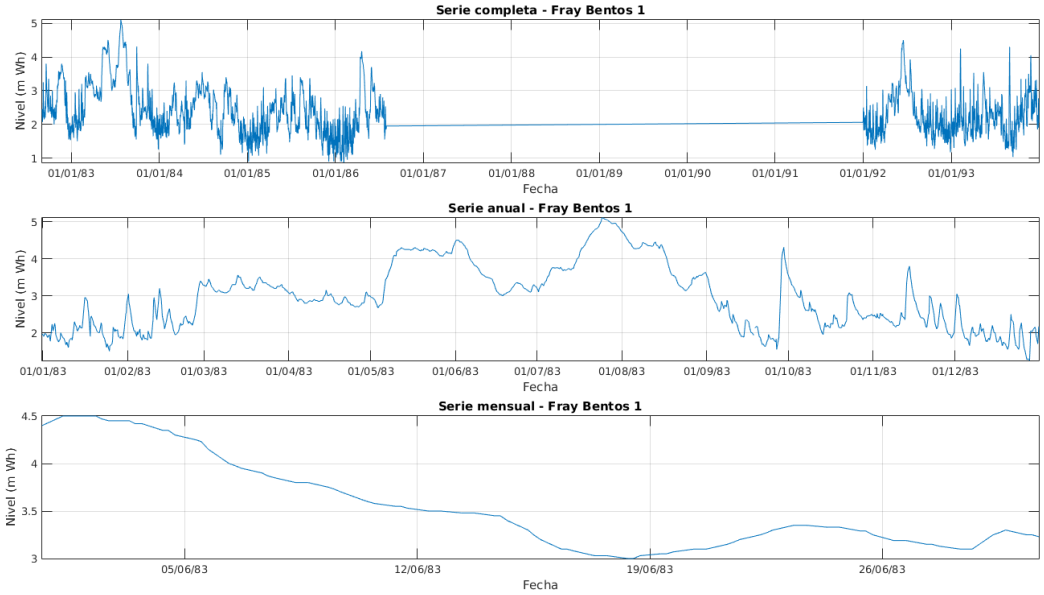


Figura 1.143: Series temporales - Fray Bentos 1 y 3.

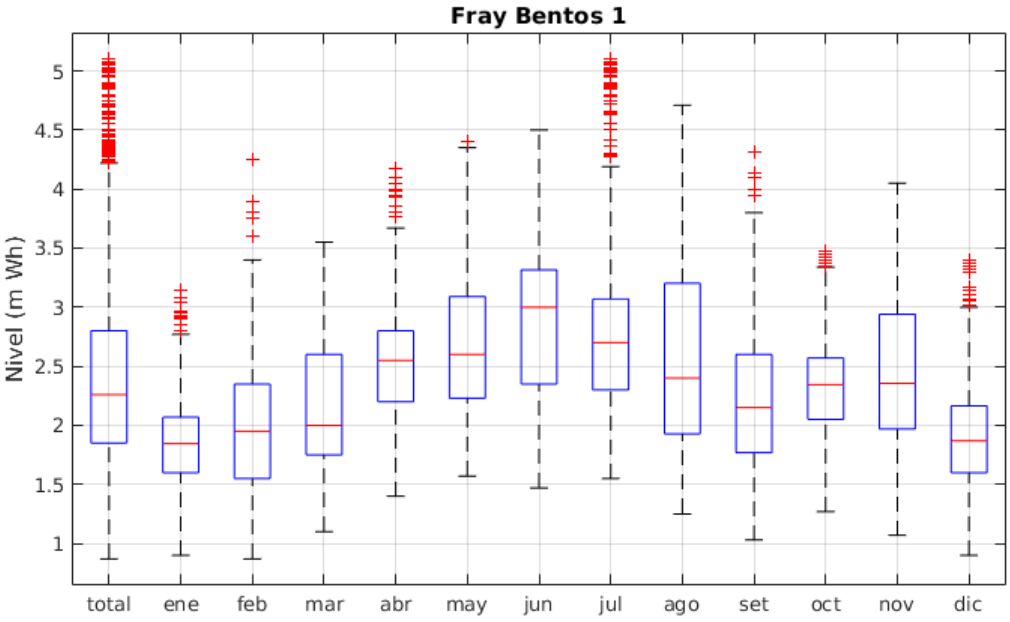
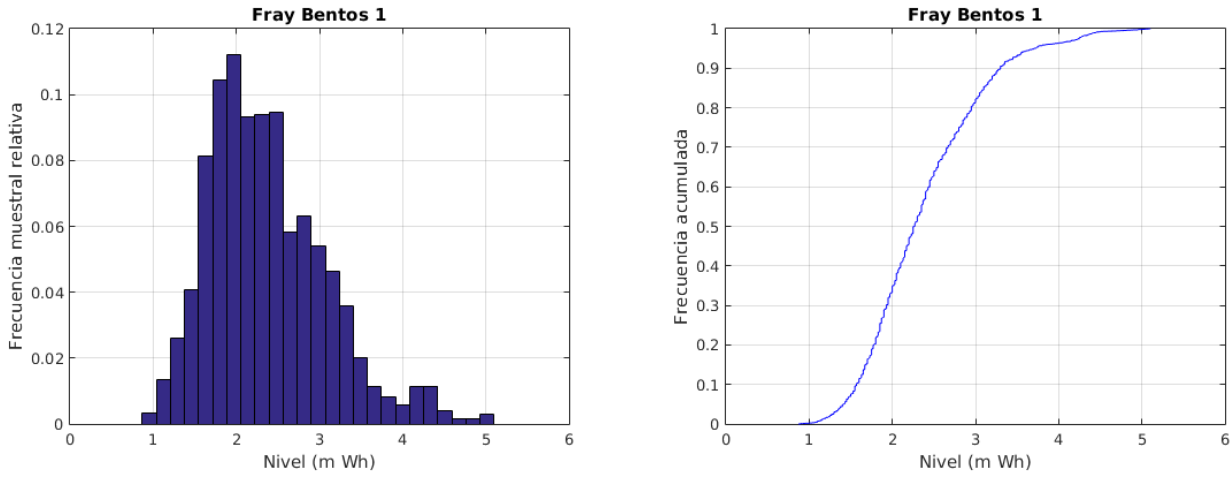


Figura 1.144: Boxplot - Fray Bentos 1 y 3.

1.5.22. Fray Bentos 2, 4 y 6

Esta serie tiene un nivel medio de 2,04 m PRH y una desviación estándar de 0,66 m. A continuación se presentan gráficos de la serie temporal, "boxplot" para la totalidad de la serie



(a) Histograma. **(b)** Frecuencia acumulada.

Figura 1.145: Fray Bentos 1 y 3

y para cada mes, histograma y frecuencia muestral relativa acumulada.

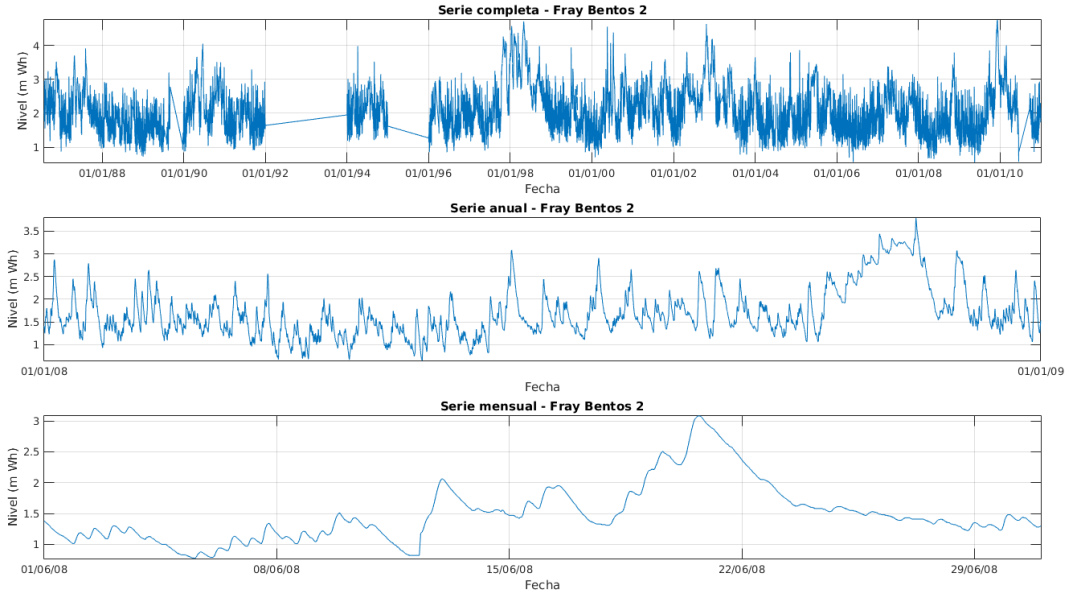
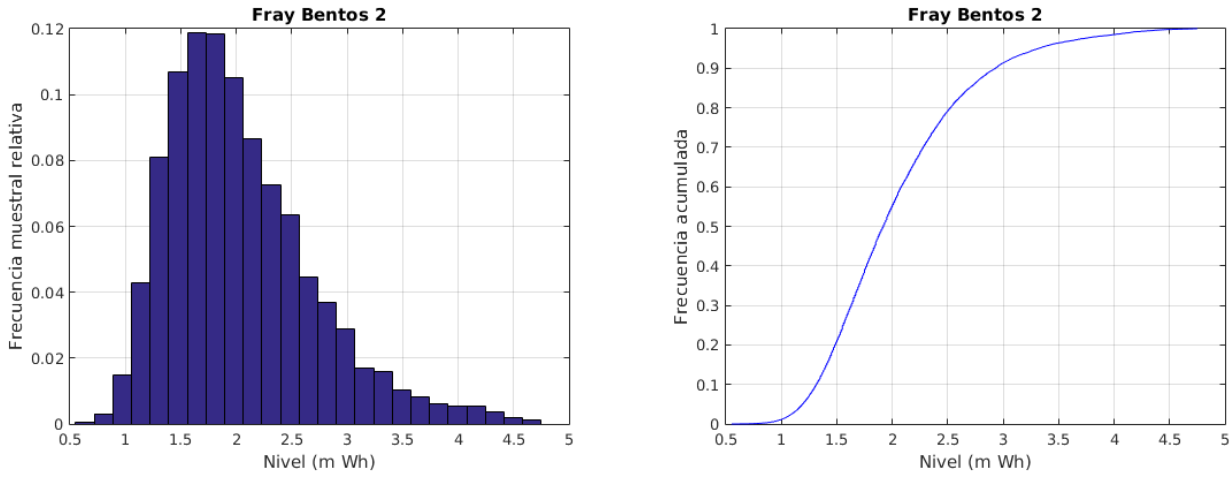


Figura 1.146: Series temporales - Fray Bentos 2, 4 y 6.



(a) Histograma. **(b)** Frecuencia acumulada.

Figura 1.148: Fray Bentos 2, 4 y 6

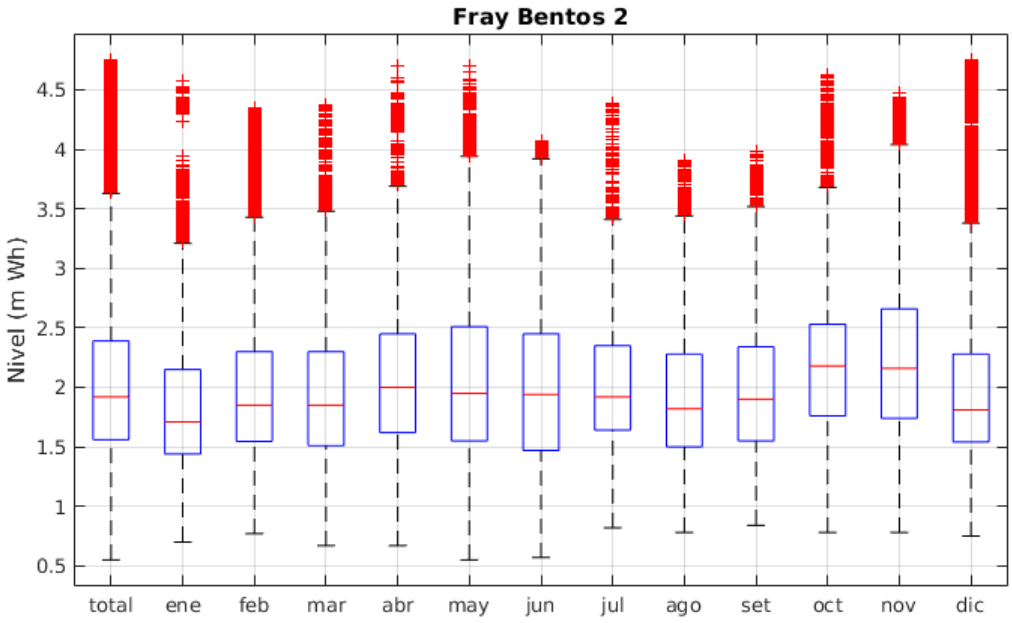


Figura 1.147: Boxplot - Fray Bentos 2, 4 y 6.

1.5.23. Fray Bentos 5

Esta serie tiene un nivel medio de 1,84 m PRH y una desviación estándar de 0,41 m. A continuación se presentan gráficos de la serie temporal, "boxplot" para la totalidad de la serie y para cada mes, histograma y frecuencia muestral relativa acumulada.

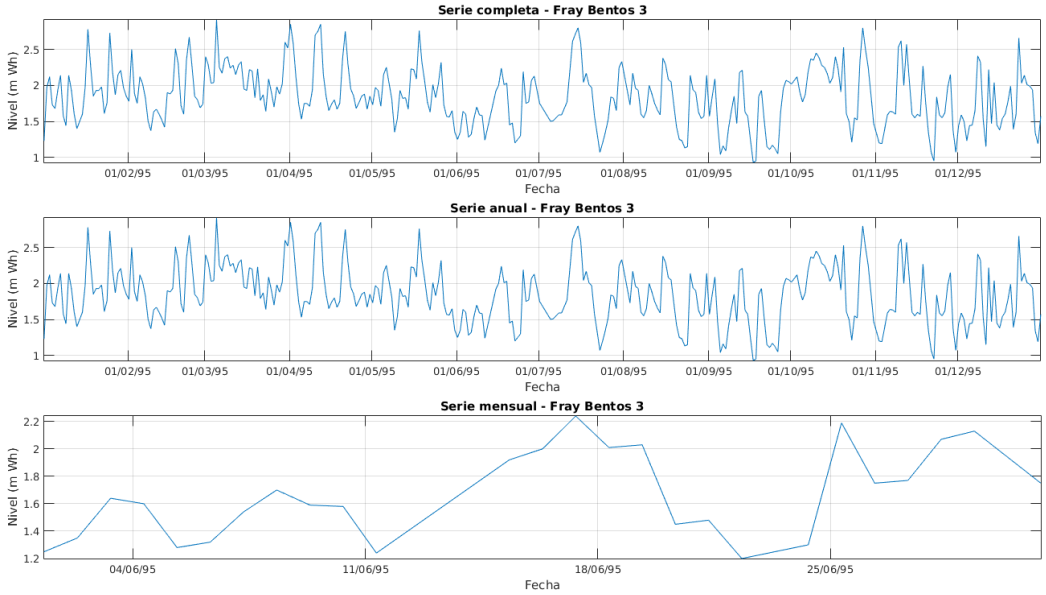


Figura 1.149: Series temporales - Fray Bentos 5.

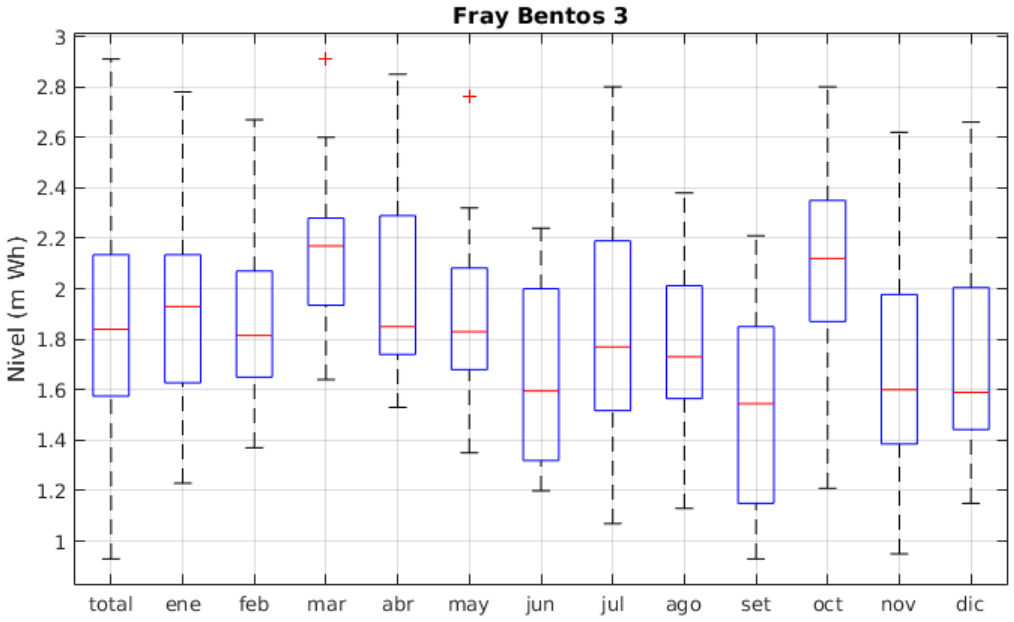
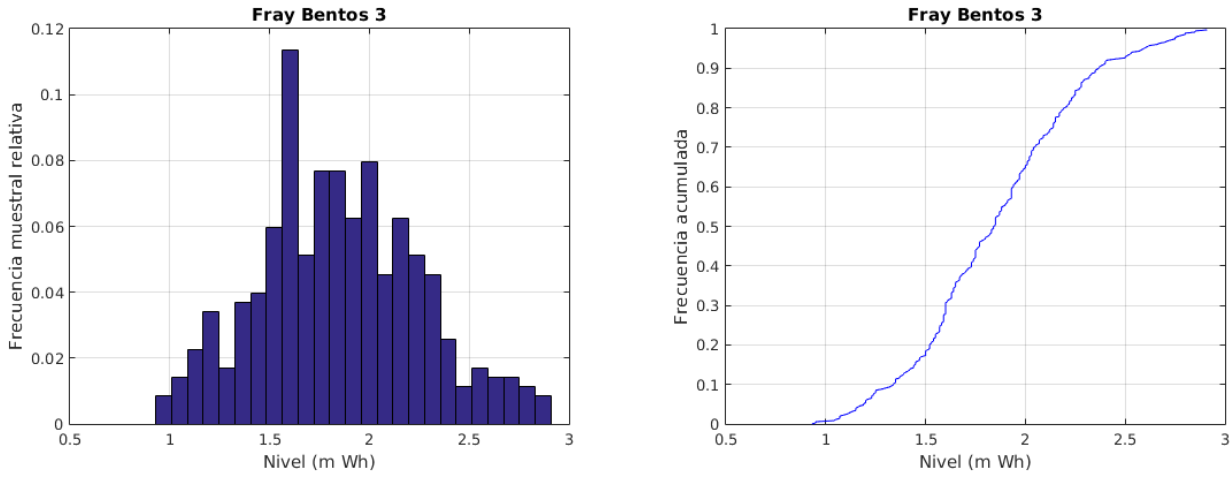


Figura 1.150: Boxplot - Fray Bentos 5.

1.5.24. Nueva Palmira 1, 3 y 5

Esta serie tiene un nivel medio de 1,79 m PRH y una desviación estándar de 0,44 m. A continuación se presentan gráficos de la serie temporal, "boxplot" para la totalidad de la serie



(a) Histograma. **(b)** Frecuencia acumulada.

Figura 1.151: Fray Bentos 5

y para cada mes, histograma y frecuencia muestral relativa acumulada.

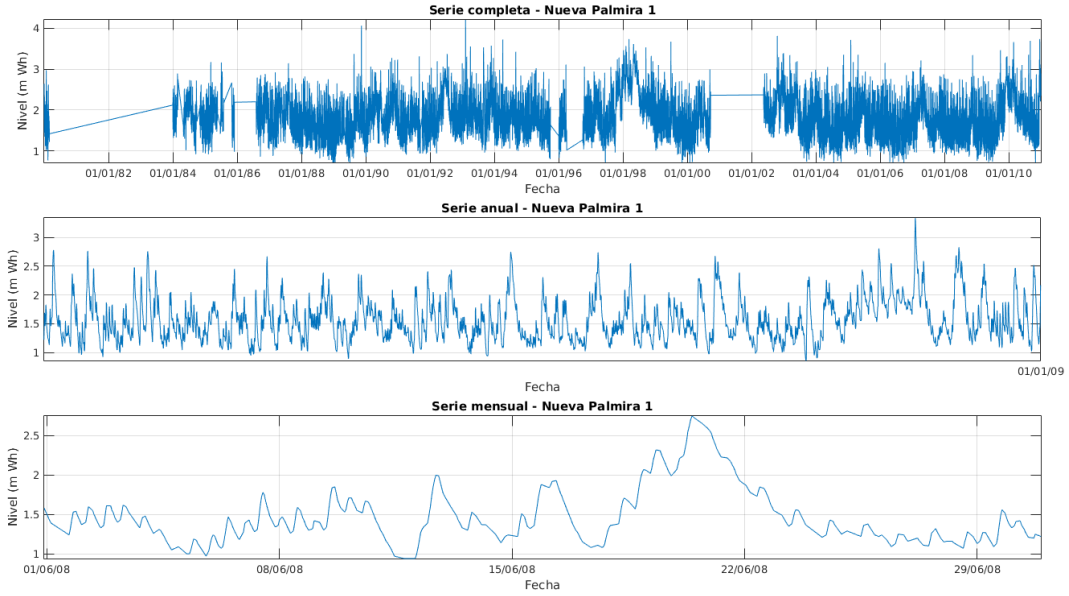
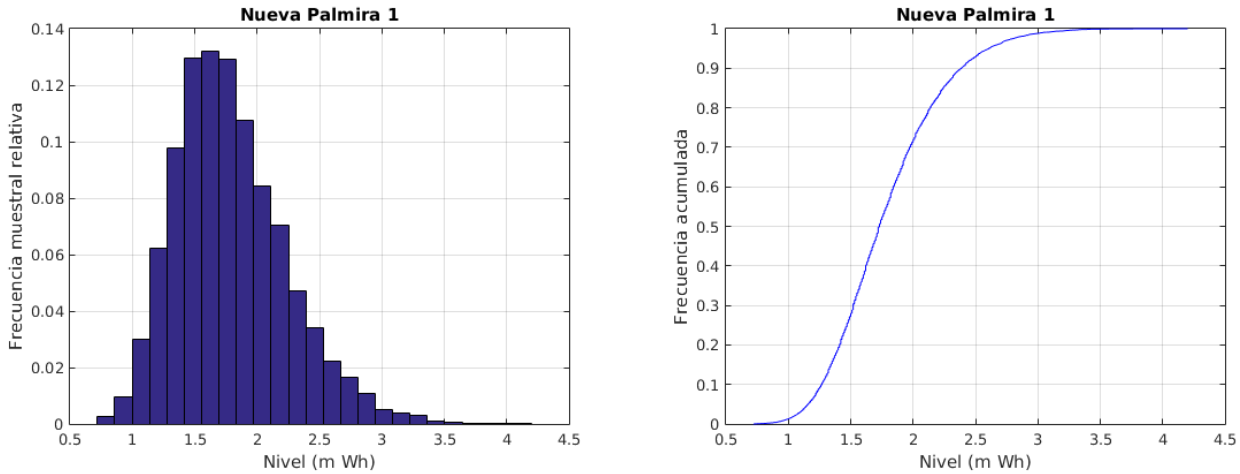


Figura 1.152: Series temporales - Nueva Palmira 1, 3 y 5.



(a) Histograma. **(b)** Frecuencia acumulada.

Figura 1.154: Nueva Palmira 1, 3 y 5

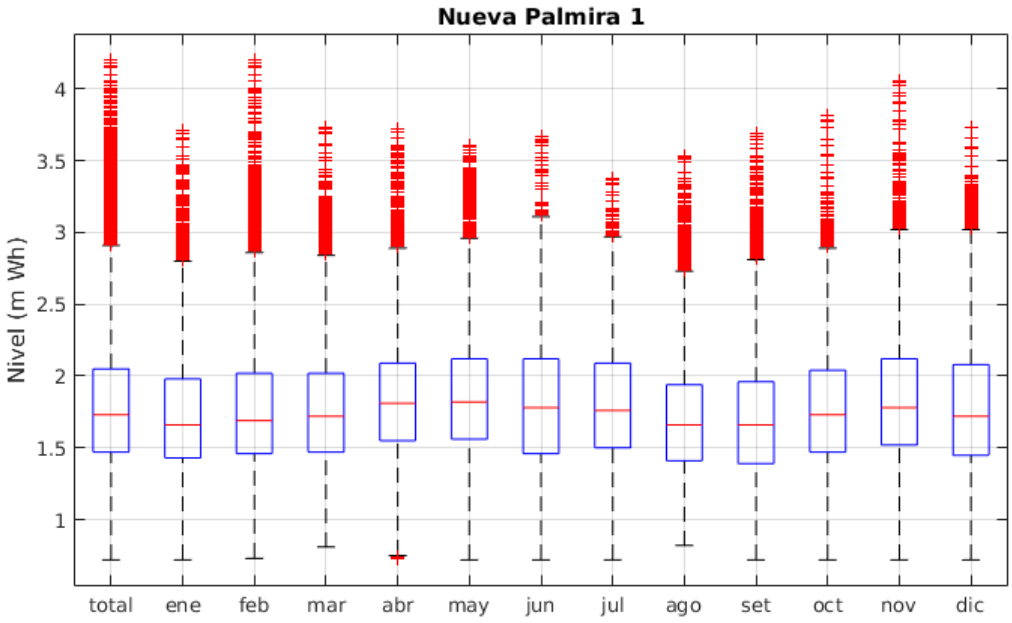


Figura 1.153: Boxplot - Nueva Palmira 1, 3 y 5.

1.5.25. Nueva Palmira 2 y 4

Esta serie tiene un nivel medio de 1,88 m PRH y una desviación estándar de 0,55 m. A continuación se presentan gráficos de la serie temporal, "boxplot" para la totalidad de la serie y para cada mes, histograma y frecuencia muestral relativa acumulada.

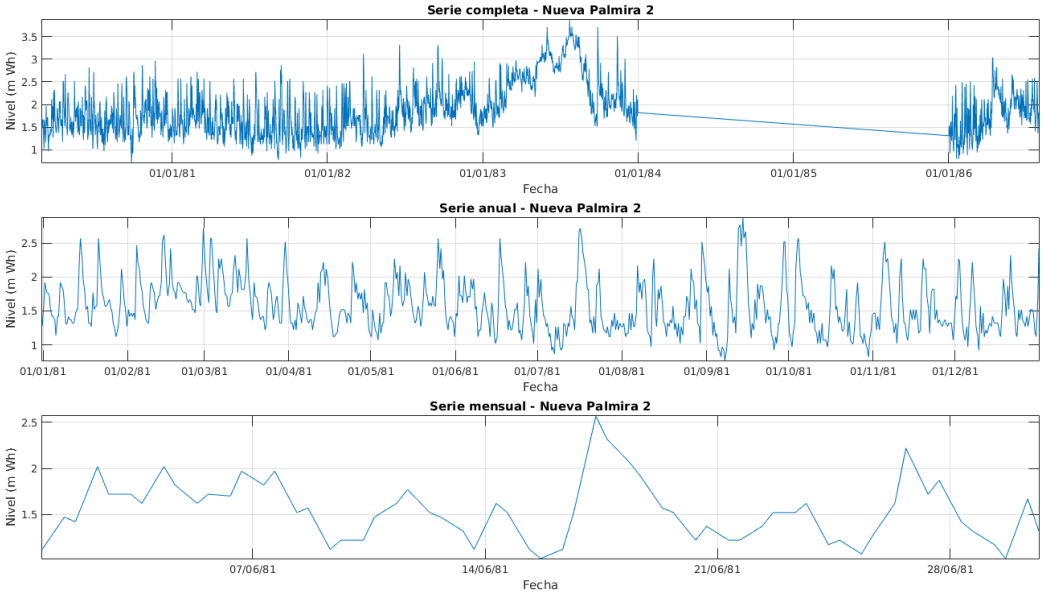


Figura 1.155: Series temporales - Nueva Palmira 1, 3 y 5.

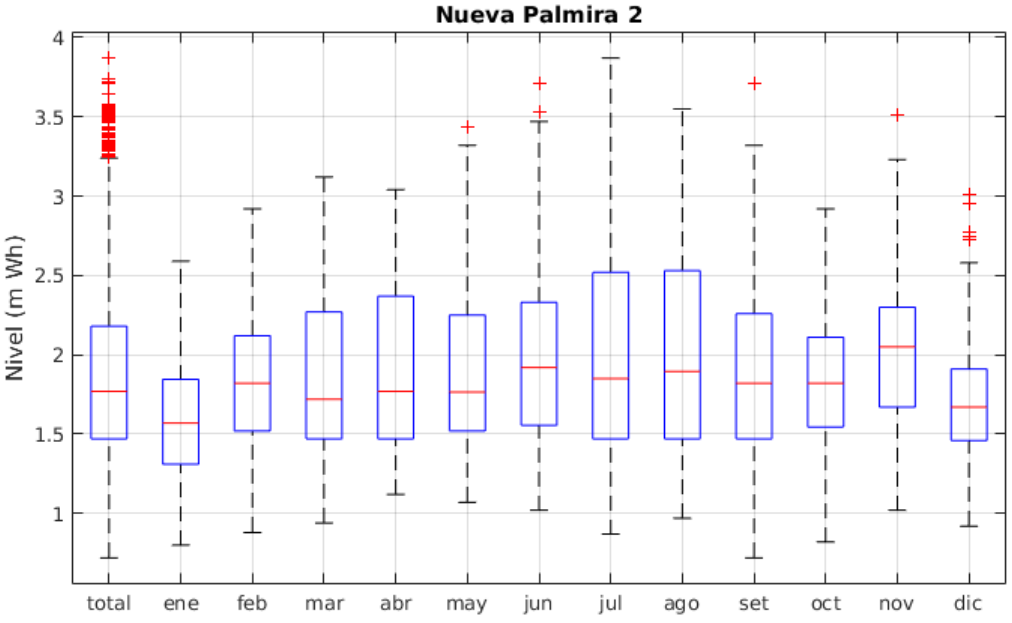
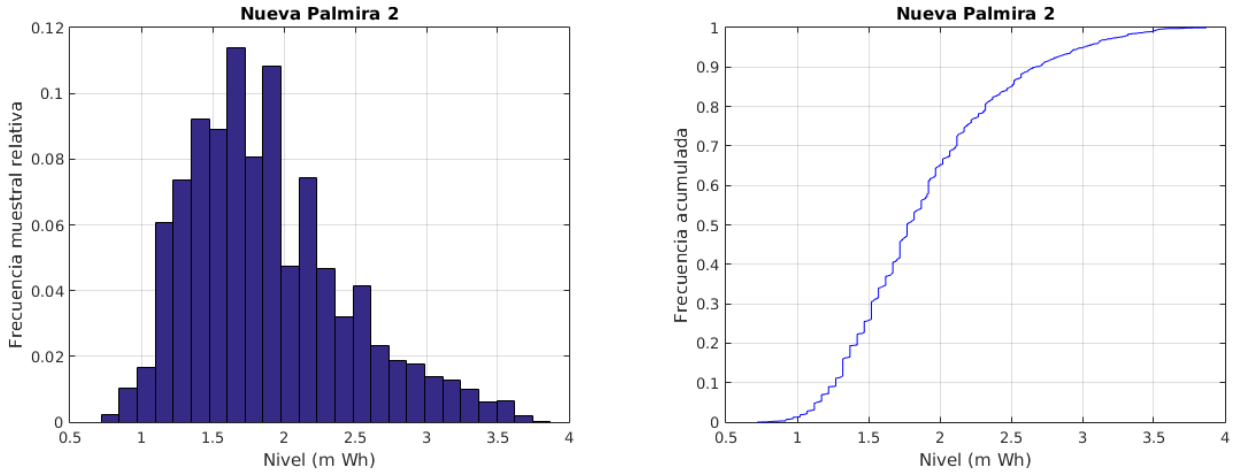


Figura 1.156: Boxplot - Nueva Palmira 1, 3 y 5.



(a) Histograma.

(b) Frecuencia acumulada.

Figura 1.157: Nueva Palmira 1, 3 y 5

Apéndice 2

Procesamiento de datos de caudal

2.1. Introducción

La presente sección tiene como objetivo plasmar el procesamiento realizado sobre las series de datos de caudales para las estaciones consideradas. Incluye un análisis de calidad de los datos y corrección o depuración de los mismos en caso de ser necesario. En función a estos datos depurados, se realiza luego una caracterización estadística del comportamiento de la variable en cada estación.

2.2. Información disponible

En la presente sección se analizan los registros de caudales de los embalses de Salto Grande, en el río Uruguay, y Palmar, en el río Negro. La información utilizada proviene del Instituto de Mecánica de los Fluidos e Ingeniería Ambiental de la Facultad de Ingeniería de la Universidad de la República (IMFIA) obtenidos de registros de las centrales hidroeléctricas de ambas estaciones. Se cuenta además con datos de caudal del Daymán correspondientes a la estación hidrométrica 140 de DINAGUA, ubicada en el puente de Ruta 3 sobre este curso, y con datos de aforo del Paraná Guazú. Se cuenta con datos de caudal del Gualeguaychú generados en base a modelaciones hidrológicas realizadas en el marco de la tesis de grado de Vanessa Erasun, becaria de la Comisión Administradora del Río Uruguay.

Se realizaron varios análisis sobre las series de caudales, haciendo especial énfasis en la serie de Salto Grande. Se describe a continuación la información disponible para cada estación, luego la metodología utilizada para el análisis exploratorio de las mismas, presentando luego los resultados para cada estación.

Estación	Salto Grande																					
Mes/Año	1995	1996	1997	1998	1999	2000	2001	2002	2003	2004	2005	2006	2007	2008	2009	2010	2011	2012	2013	2014	2015	2016
Enero	744	744	744	744	744	744	744	744	744	744	744	744	744	744	744	744	744	744	744	744	723	744
Febrero	672	696	672	672	672	696	672	672	672	696	672	672	672	696	672	672	672	696	672	672	671	696
Marzo	744	744	744	744	744	744	744	744	744	744	744	744	744	744	744	744	744	744	744	744	744	535
Abril	720	720	720	720	720	720	720	720	720	720	720	720	720	720	720	720	720	720	720	720	720	0
Mayo	744	744	744	744	744	744	744	744	744	744	744	744	744	744	744	744	744	744	744	742	744	0
Junio	720	720	720	720	720	720	720	720	720	720	720	720	720	720	720	720	720	720	720	720	719	0
Julio	744	744	744	744	744	744	744	744	744	744	744	744	744	744	744	744	744	744	744	744	744	0
Agosto	744	744	744	744	744	744	744	744	744	744	744	744	744	744	744	744	744	744	744	744	744	0
Setiembre	720	720	720	720	720	720	720	720	720	720	720	720	720	720	720	720	720	720	720	720	720	0
Octubre	744	744	744	744	744	744	744	744	744	744	744	744	744	744	744	744	744	744	744	744	744	0
Noviembre	720	720	720	720	720	720	720	720	720	720	720	720	720	720	720	720	720	720	720	720	720	0
Diciembre	744	744	744	744	744	744	744	744	744	744	744	744	744	744	744	744	744	744	744	744	742	0

Tabla 2.1: Densidad de datos para Salto Grande.

Estación	Palmar												
Mes/Año	2004	2005	2006	2007	2008	2009	2010	2011	2012	2013	2014	2015	2016
Enero	31	31	31	31	31	31	31	31	31	31	31	31	31
Febrero	29	28	28	28	29	28	28	28	29	28	28	28	29
Marzo	31	31	31	31	31	31	31	31	31	31	31	31	28
Abril	30	30	30	30	30	30	30	30	30	30	30	30	0
Mayo	31	31	31	31	31	31	31	31	31	31	31	31	0
Junio	30	30	30	30	30	30	30	30	30	30	30	30	0
Julio	31	31	31	31	31	31	31	31	31	31	31	31	0
Agosto	31	31	31	31	31	31	31	31	31	31	31	31	0
Setiembre	30	30	30	30	30	30	30	30	30	30	30	30	0
Octubre	31	31	31	31	31	31	31	31	31	31	31	31	0
Noviembre	30	30	30	30	30	30	30	30	30	30	30	30	0
Diciembre	31	31	31	31	31	31	31	31	31	31	31	31	0

Tabla 2.2: Densidad de datos para Palmar.

2.2.1. Salto Grande

Para Salto Grande se cuenta con datos de caudales desde 1995 hasta 2016, con frecuencia de registro horaria. Se cuenta por separado con datos de caudal turbinado y caudal vertido, la suma de los cuales corresponde al caudal total que pasa por Salto Grande en un momento dado. En la tabla 2.1 se presenta la densidad de datos para Salto Grande.

2.2.2. Palmar

Para Palmar se cuenta con datos de caudal total desde 2004 hasta 2016, con frecuencia de registro diaria. En la tabla 2.2 se presenta la densidad de datos para Palmar.

Estación	Daymán																														
Mes/Año	1980	1981	1982	1983	1984	1985	1986	1987	1988	1989	1990	1991	1992	1993	1994	1995	1996	1997	1998	1999	2000	2001	2002	2003	2004	2005	2006	2007	2008	2009	2010
Enero	31	31	31	31	31	31	31	31	31	31	31	31	31	31	31	31	31	31	31	31	31	31	31	31	31	31	31	31	31	31	31
Febrero	29	28	28	28	25	28	28	28	29	28	28	28	29	28	28	28	29	28	28	28	29	28	28	28	29	28	28	28	29	28	28
Marzo	31	31	31	31	31	31	31	31	31	31	31	31	31	31	31	31	31	30	31	31	31	31	25	31	31	31	31	31	11	31	31
Abril	30	30	30	30	30	30	30	30	30	30	30	30	30	30	30	30	30	30	30	30	30	27	23	30	30	30	30	30	0	30	30
Mayo	31	31	31	31	31	31	31	31	31	31	31	31	31	29	31	31	31	31	31	31	25	30	31	31	31	31	31	31	0	31	31
Junio	30	30	30	30	30	30	30	30	30	30	30	30	30	24	30	30	30	30	30	30	28	26	30	30	30	30	30	30	18	30	30
Julio	31	31	31	31	31	30	31	31	31	31	31	31	31	31	31	31	31	31	31	27	29	31	31	31	31	31	31	31	31	31	31
Agosto	31	31	31	31	31	31	31	31	31	31	31	31	31	31	31	31	31	31	31	31	31	29	31	31	31	31	31	31	31	31	31
Setiembre	30	30	30	30	30	29	30	30	30	30	30	30	30	30	30	30	30	30	30	30	28	29	30	30	30	30	30	30	30	30	30
Octubre	31	31	31	31	29	31	31	31	31	31	31	31	31	31	31	31	31	31	31	31	31	26	31	31	31	31	31	31	31	31	31
Noviembre	30	30	30	30	30	30	30	30	30	30	30	30	30	30	30	30	30	30	30	30	30	30	30	30	30	30	30	30	30	30	30
Diciembre	31	31	31	31	31	31	31	31	31	31	31	31	31	31	31	31	31	31	31	31	31	30	31	31	31	31	31	31	31	31	31

Tabla 2.3: Densidad de datos para el Daymán.

2.2.3. Daymán

Para Daymán se cuenta con datos de caudal desde 1980 hasta 2010 inclusive. En la tabla 2.3 se presenta la densidad de datos del Daymán.

2.2.4. Paraná Bravo

Para el Paraná Bravo se cuenta con la totalidad de la serie de datos con paso diario desde 1980 a 2016 inclusive, escalados en base a la serie de datos correspondiente al Paraná Guazú, considerando que corresponde al 31 % del caudal de este (Sabarots et al., 2012).

2.2.5. Gualeguaychú

Para el Gualeguaychú se cuenta con datos generados en base a modelación hidrológica de paso diario desde el 2004 al 2010 inclusive (Erasun, 2018), Estudio de factibilidad de modelación hidrológica en subcuencas del río Uruguay para la gestión del riesgo de inundaciones aguas abajo de la represa de Salto Grande).

2.3. Gráficos temporales de series de caudales

2.3.1. Salto Grande

Se presenta a continuación la serie de datos original para Salto Grande. En esta se logra evidenciar que se tiene valores de caudal menores a 0, los cuales son incorrectos. En base a esto, se eliminan los valores de caudal menores a 0 tanto de la serie de caudal vertido como de

la de caudal turbinado, generando una nueva serie de caudal total con la suma de estas. No se detectan otras anomalías o errores de medición (ver figura 2.1).

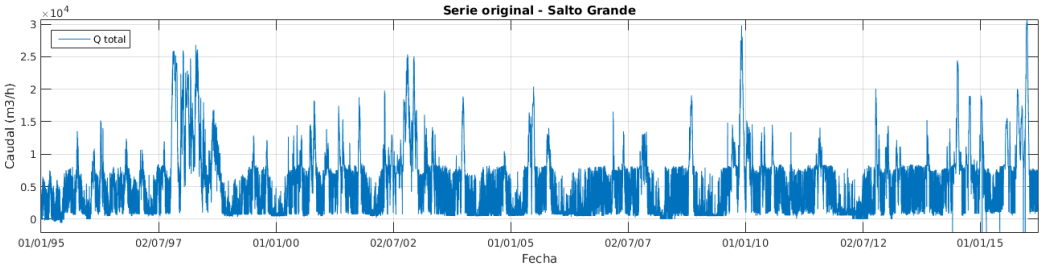


Figura 2.1: Serie de datos original para Salto Grande.

2.3.2. Palmar

No se detectan anomalías o errores de medición para Palmar, por lo que no es necesario modificar la serie de datos original.

2.3.3. Daymán

No se detectan anomalías o errores de medición para Palmar, por lo que no es necesario modificar la serie de datos original.

2.3.4. Paraná Bravo

No se detectan anomalías o errores de medición para Palmar, por lo que no es necesario modificar la serie de datos original.

2.4. Análisis exploratorio de series de caudales

2.4.1. Metodología

Se sistematizó la información disponible en cada una de las estaciones mencionadas, realizando un análisis de calidad de los datos, y cuantificando la densidad de los mismos tanto por día como por mes. Se descartaron tramos de las series donde se observaran anomalías que no pudieran ser corregidas en base a un análisis más minucioso de los datos originales.

Sobre la totalidad de los datos así obtenidos se calcularon parámetros estadísticos básicos como el caudal medio y su desviación estándar. Se presentan gráficos de la evolución temporal de cada serie en distintas escalas temporales: totalidad de la duración de la serie, un año particular y un mes particular, de modo de contar con una noción del comportamiento de la variable en cuestión.

De modo de visualizar la variación anual de los caudales, se consideran las series de datos correspondientes a cada mes (todos los meses de enero juntos en una serie, todos los de febrero y así). En base a estas series se realiza un gráfico de barras indicando el caudal medio de ese mes y su desviación estándar, y un gráfico tipo boxplot donde se muestra la mediana de cada mes, sus percentiles 75 y 25 y valores extraordinarios (calculados como los valores mayores a $p_{75} + 1,5 \times (p_{75} - p_{25})$ y menores a $p_{25} - 1,5 \times (p_{75} - p_{25})$).

A los efectos de visualizar la distribución de los valores de caudales (densidad de frecuencia muestral relativa), se presenta un histograma de cada serie de caudales. Se presenta además un gráfico de frecuencia muestral relativa acumulada, o lo que es lo mismo, de la frecuencia de no excedencia de caudales (complementario de la frecuencia de excedencia).

2.4.2. Resultados

Salto Grande

Esta serie tiene un caudal medio de 5.401 m^3/s y una desviación estándar de 4.841 m^3/s. A continuación se presentan gráficos de la serie temporal, boxplot para la totalidad de la serie y para cada mes, histograma y frecuencia muestral relativa acumulada (figuras 2.2, 2.3, 2.4a y 2.4b). Para Salto Grande también se graficó la evolución conjunta de los caudales con los niveles en distintas estaciones aguas abajo, así como la nube de puntos nivel-caudal considerando distintos tiempos de desfase (esto es, graficando el nivel registrado en un momento dado con el caudal registrado para un paso de tiempo anterior, lo cual se muestra en las figuras 2.6, 2.7, 2.9, 2.10).

Tanto para Salto como para Concordia se puede observar una buena correlación entre los datos de niveles y caudales. Se observa una mayor dispersión en los niveles para caudales bajos, menores a 8.000 m^3/s, los cuales se dan cuando el caudal por el vertedero es nulo (solamente pasa agua por las turbinas). En el gráfico de evolución temporal conjunta se evidencia un desfase entre el caudal en Salto Grande y el nivel en Salto (los picos de la serie de caudales se dan antes en el tiempo que los de la serie de niveles), por lo que se estudia cómo varía la nube de puntos caudal-nivel corriendo hacia atrás en el tiempo los datos de niveles en pasos de una hora. De este modo de obtiene, tanto para Salto como para Concordia, que la dispersión disminuye para desfases de entre 2 y 3 horas, presentando mayores coeficientes de correlación entre las variables caudal y nivel (ver figuras 2.8a, 2.8b y 2.11a).

Para el caso de Paysandú, la dispersión de los datos es mucho mayor, pero se evidencia de todos modos una correlación positiva clara entre caudales y niveles. Se observa el mismo comportamiento que en Salto y Concordia respecto a caudales menores a 8.000 m^3/s aproximadamente. La dispersión de los datos disminuye para un desfase de 40 horas, presentando un máximo de correlación (ver figura 2.11b).

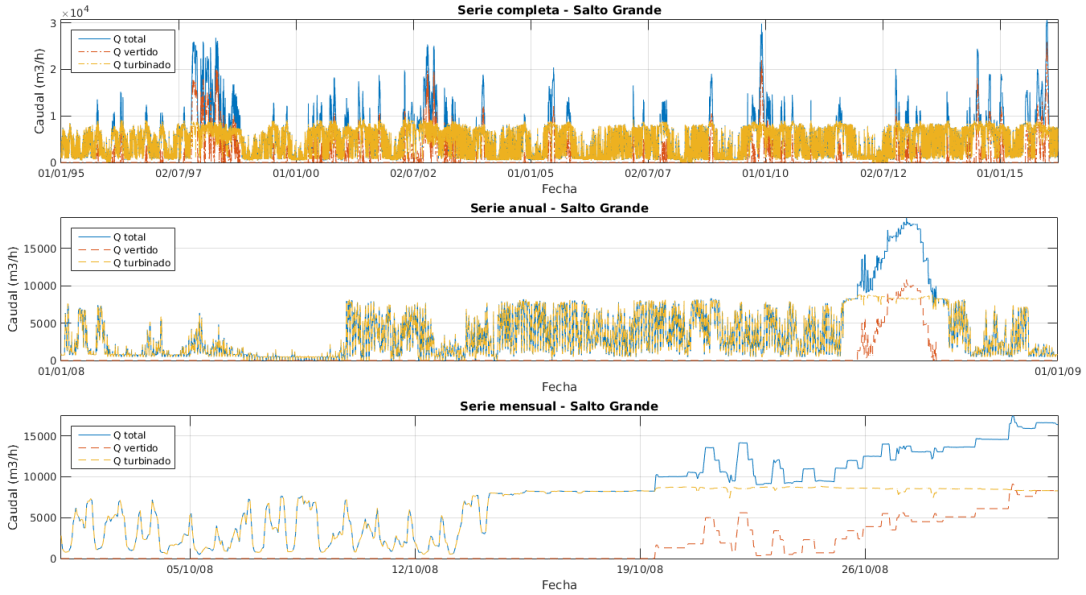


Figura 2.2: Series temporales de caudales para Salto Grande.

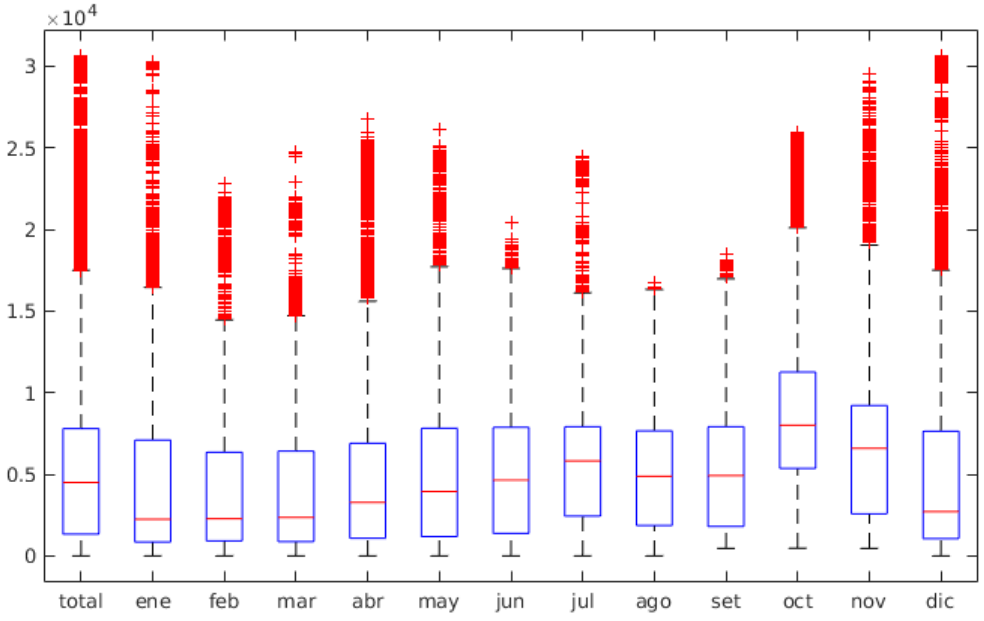
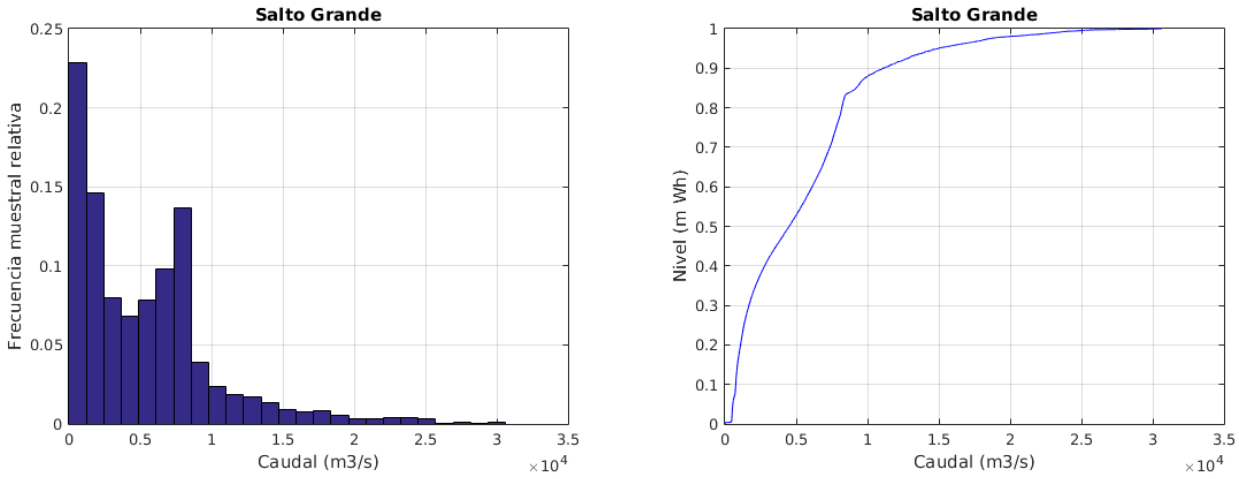


Figura 2.3: Boxplot - Salto Grande.



(a) Histograma. **(b)** Frecuencia acumulada.

Figura 2.4: Salto Grande

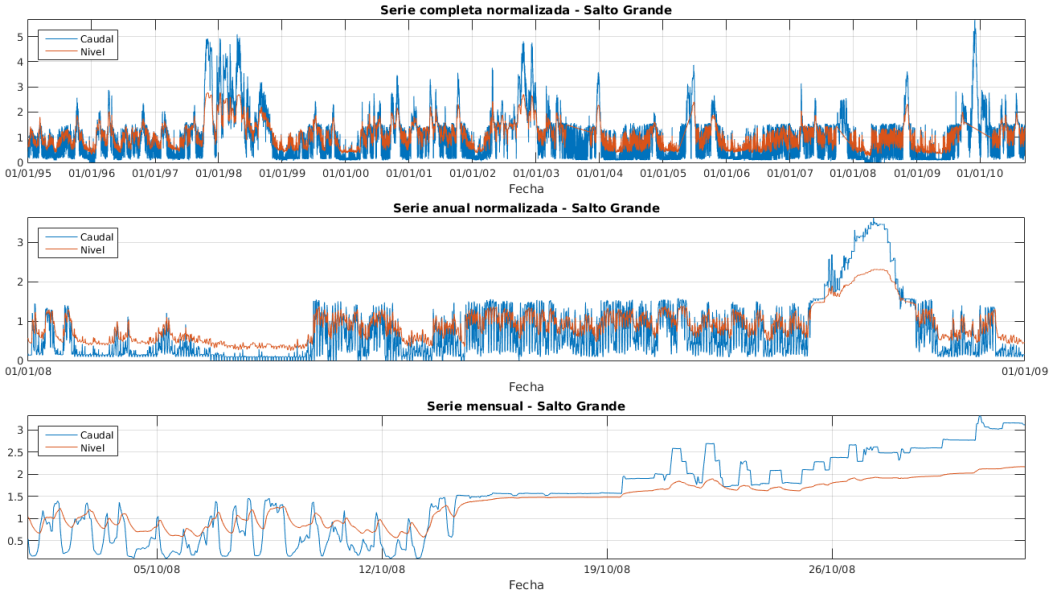


Figura 2.5: Evolución temporal conjunta de caudales de Salto Grande y niveles en Salto.

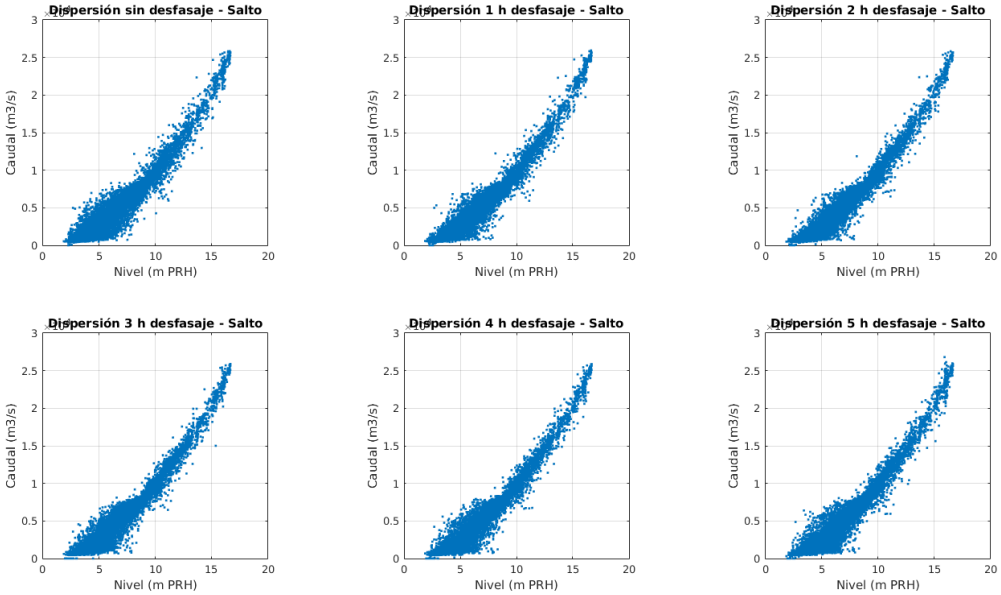


Figura 2.6: Nubes de puntos caudal-nivel para Salto (tramo de 1995 a 2002).

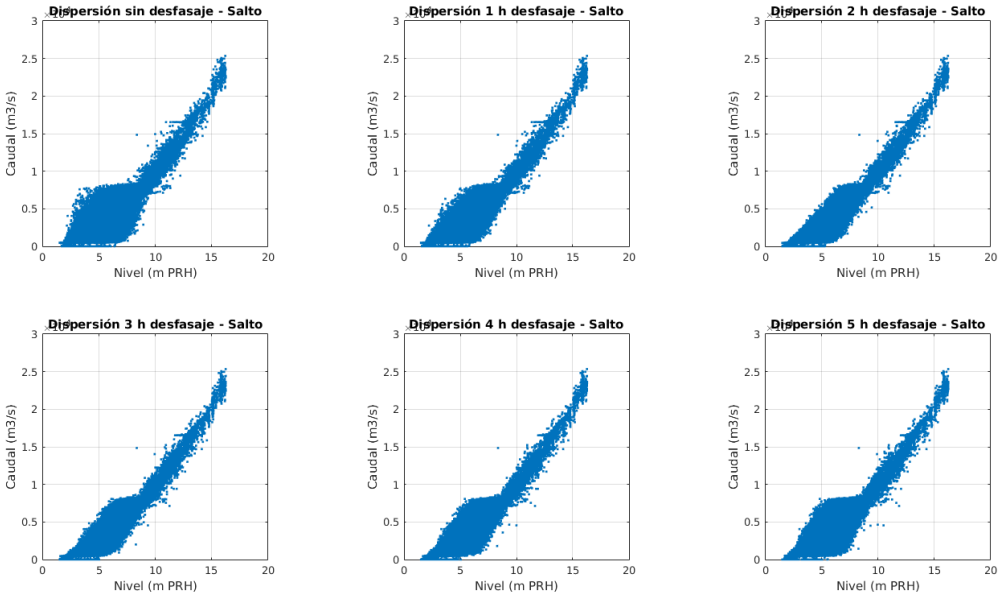
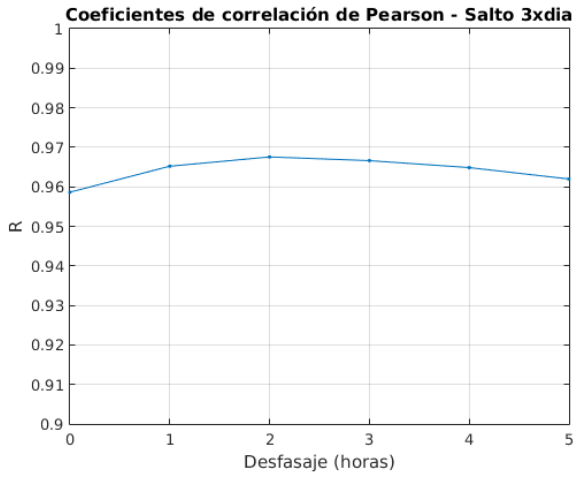
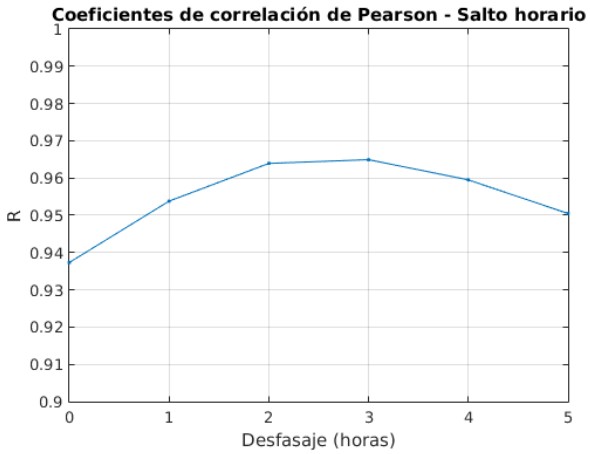


Figura 2.7: Nubes de puntos caudal-nivel para Salto (tramo de 2002 a 2010).



(a) Coeficiente de correlación de Pearson para Salto (tramo de 1995 a 2002).



(b) Coeficiente de correlación de Pearson para Salto (tramo de 2002 a 2010).

Figura 2.8: Coeficientes de correlación para tramos de datos de Salto Grande y Salto.

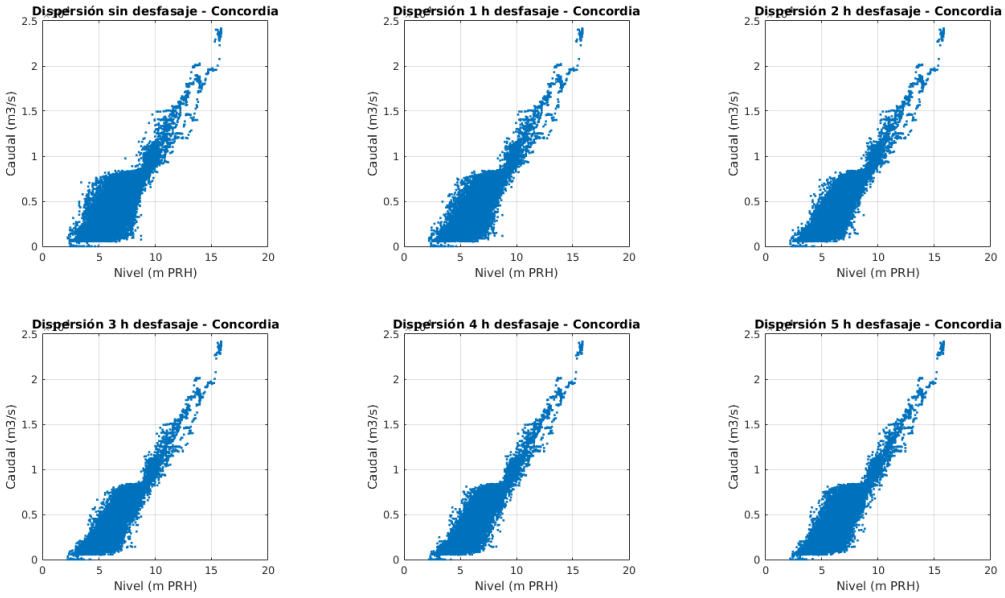
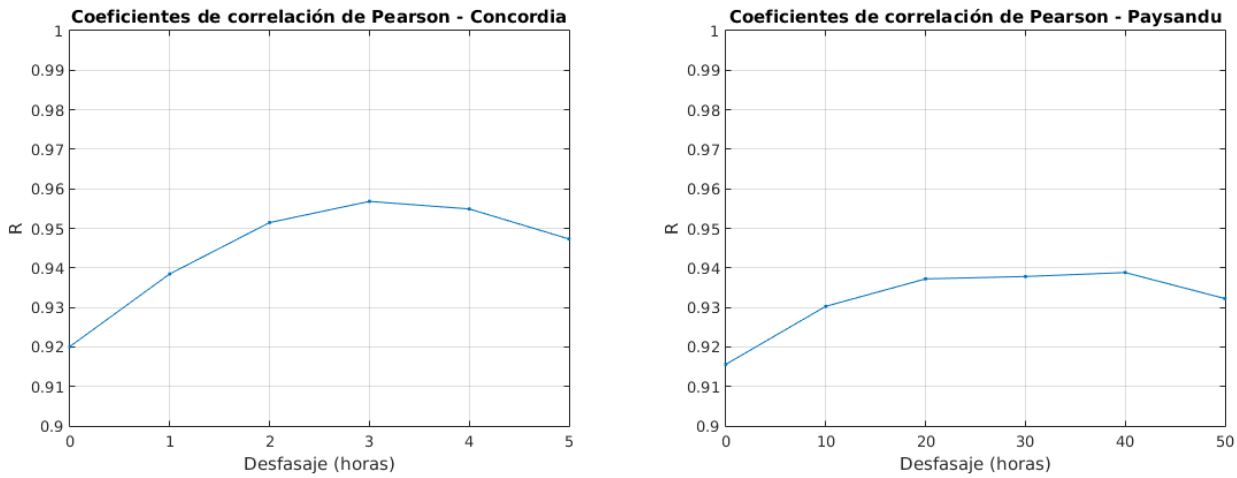


Figura 2.9: Nubes de puntos caudal-nivel para Concordia (tramo de 2012 a 2015).



(a) Coeficiente de correlación de Pearson para Concordia (tramo de 2012 a 2015).

(b) Coeficiente de correlación de Pearson para Paysandú (tramo de 1995 a 2010).

Figura 2.11: Coeficientes de correlación para tramos de datos de Salto Grande y Paysandú.

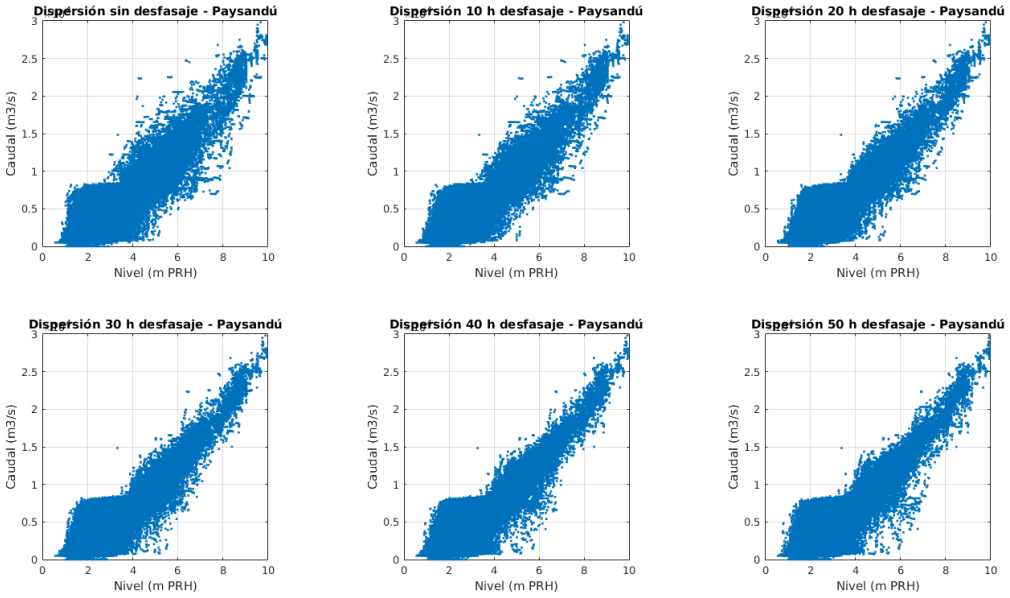


Figura 2.10: Nubes de puntos caudal-nivel para Paysandú (tramo de 1995 a 2010).

Palmar

Esta serie tiene un caudal medio de 817 m^3/s y una desviación estándar de 968 m^3/s. A continuación se presentan gráficos de la serie temporal, boxplot para la totalidad de la serie y para cada mes, histograma y frecuencia muestral relativa acumulada (ver figuras 2.12, 2.13, 2.14a y 2.14).

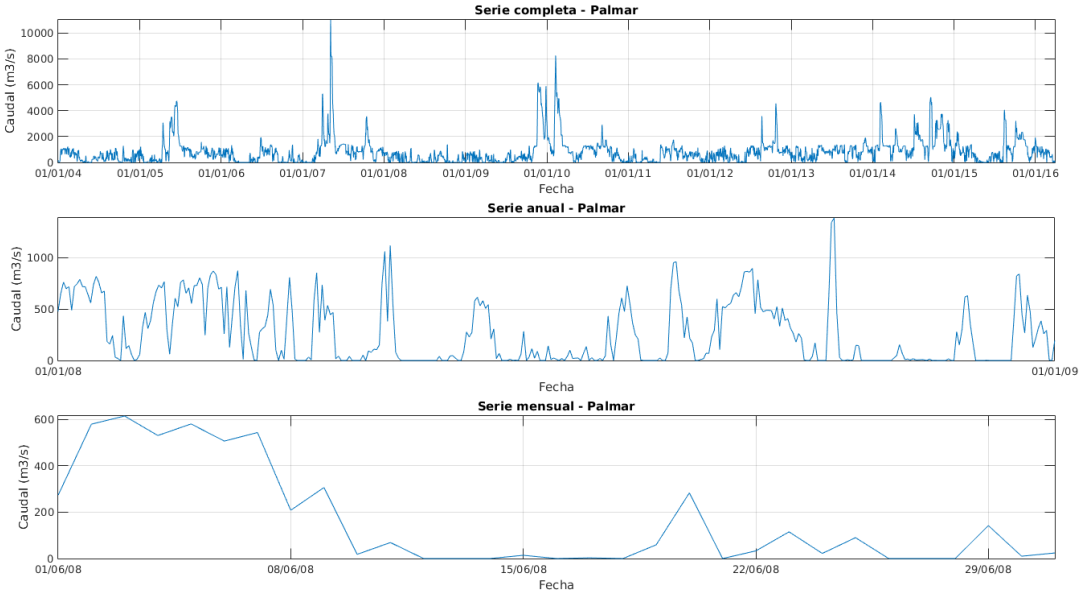


Figura 2.12: Series temporales de caudales para Palmar.

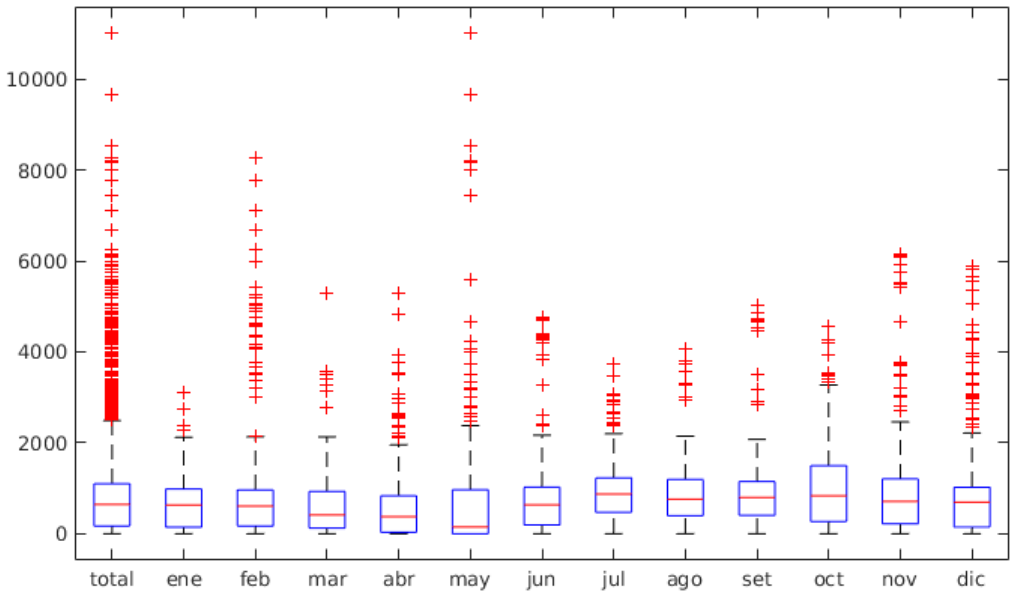
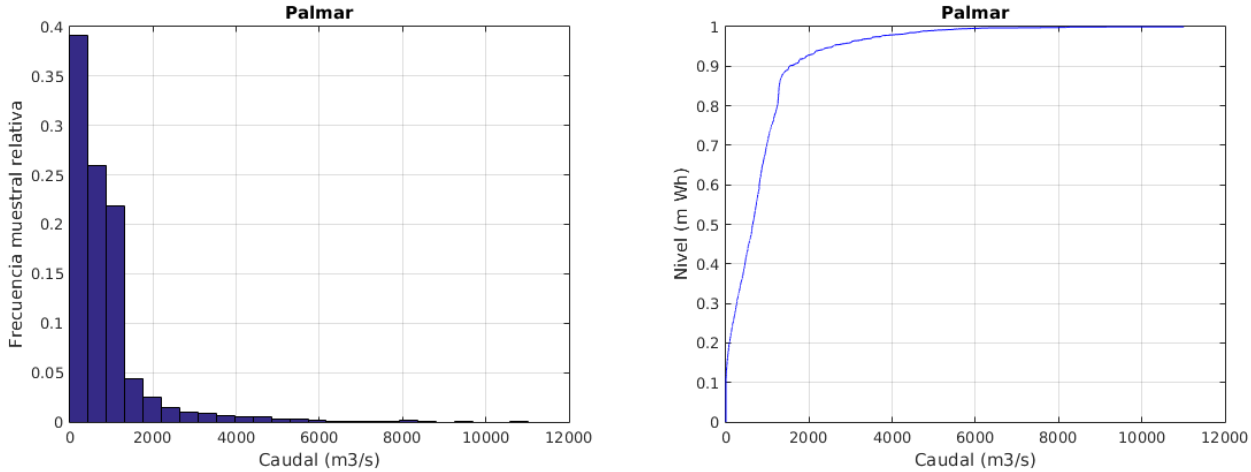


Figura 2.13: Boxplot - Palmar.

Daymán

Esta serie tiene un caudal medio de 82 m^3/s y una desviación estándar de 257 m^3/s. A continuación se presentan gráficos de la serie temporal, boxplot para la totalidad de la serie



(a) Histograma. **(b)** Frecuencia acumulada.

Figura 2.14: Palmar

y para cada mes, histograma y frecuencia muestral relativa acumulada (ver figuras 2.15, 2.16, 2.17a y 2.17).

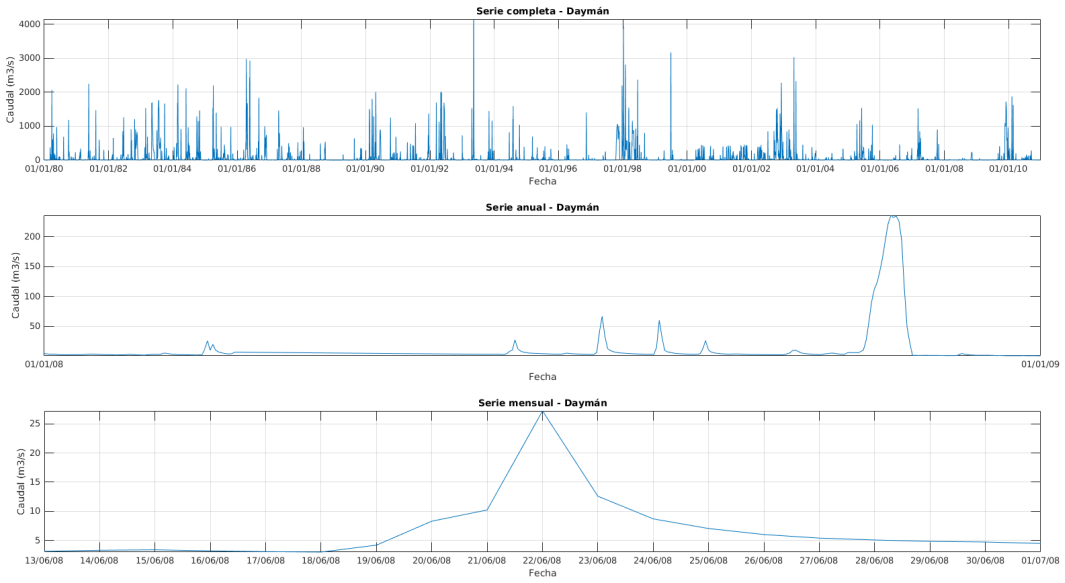
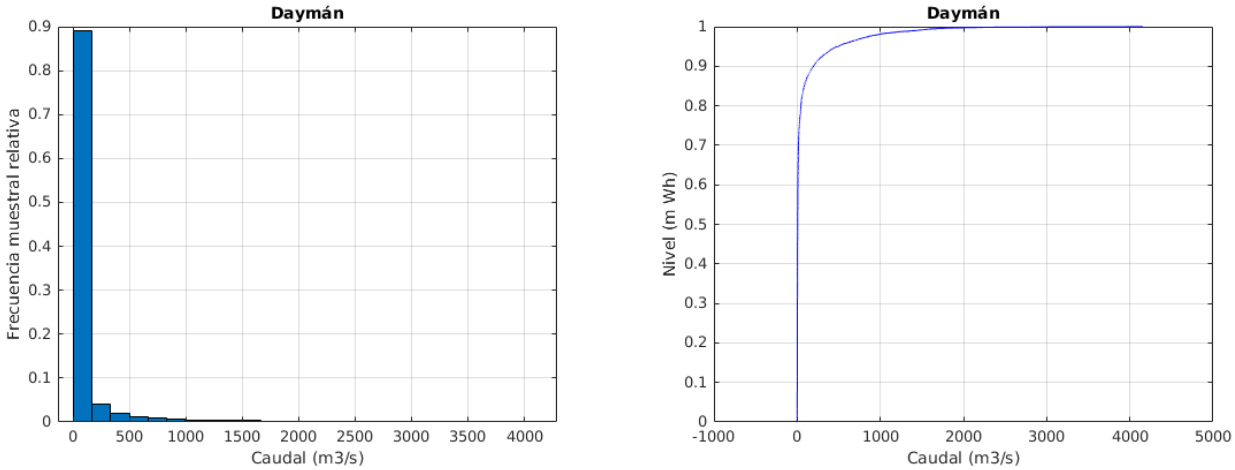


Figura 2.15: Series temporales de caudales para Daymán.



(a) Histograma. **(b)** Frecuencia acumulada.

Figura 2.17: Daymán

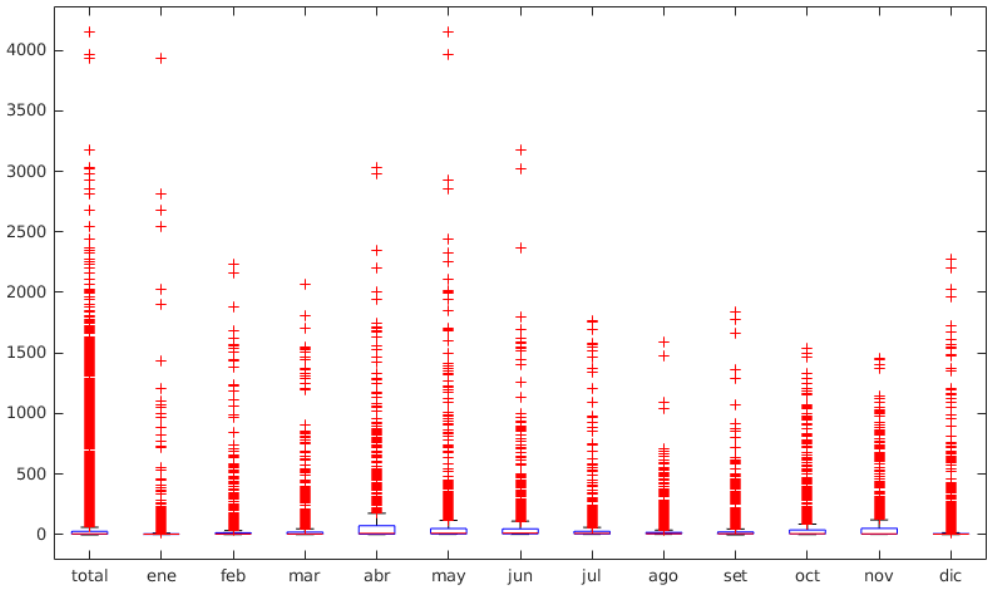


Figura 2.16: Boxplot - Daymán.

Paraná Guazú

Esta serie tiene un caudal medio de 11.375 m^3/s y una desviación estándar de 3.883 m^3/s. A continuación se presentan gráficos de la serie temporal, boxplot para la totalidad de la serie y para cada mes, histograma y frecuencia muestral relativa acumulada (ver figuras 2.18, 2.19, 2.20a y 2.20).

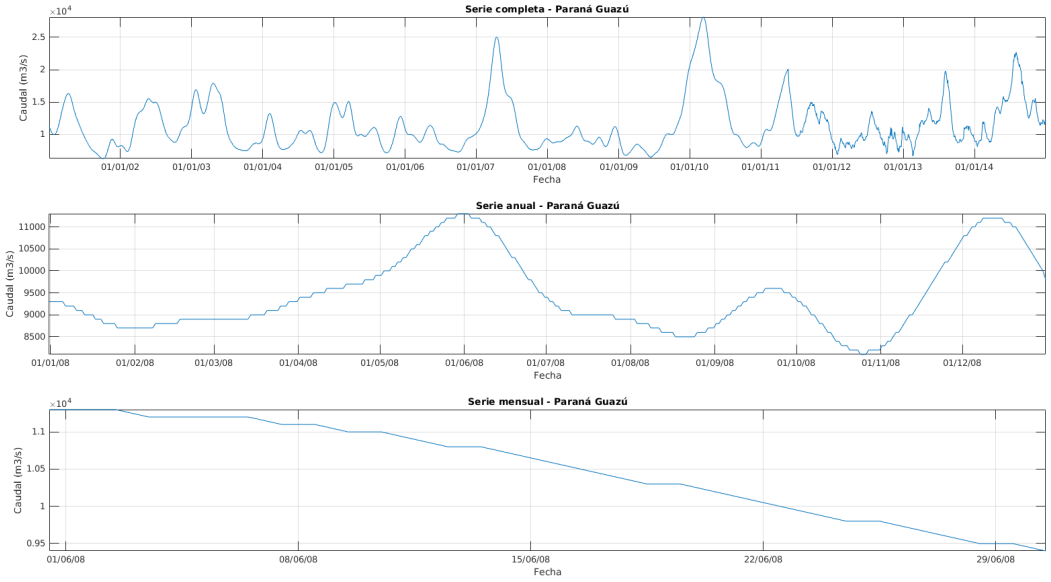


Figura 2.18: Series temporales de caudales para Paraná Guazú.

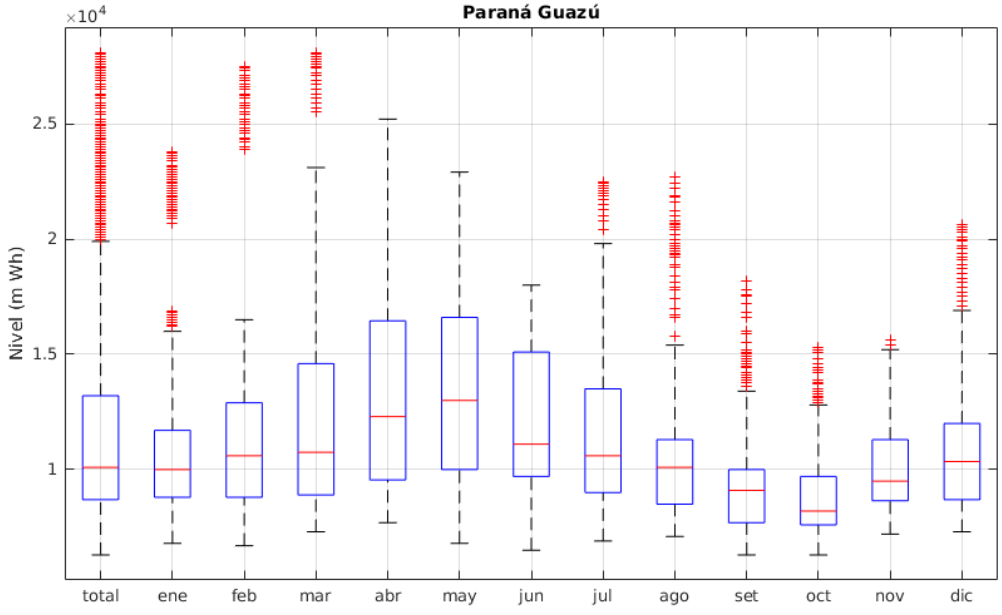
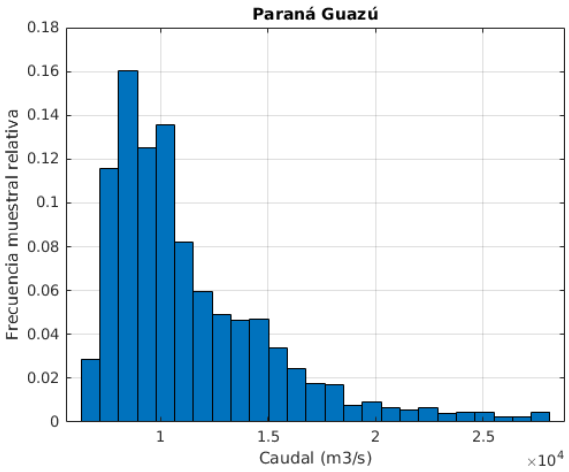
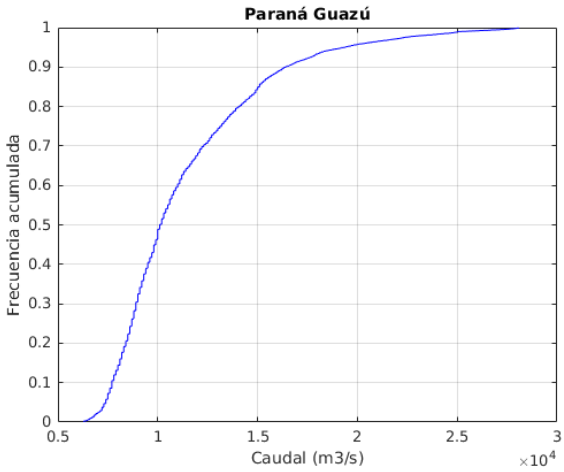


Figura 2.19: Boxplot - Paraná Guazú.



(a) Histograma.



(b) Frecuencia acumulada.

Figura 2.20: Paraná Guazú

Apéndice 3

Procesamiento de datos de velocidad

En este apéndice se presenta el procesamiento realizado a los datos de velocidad relevados mediante ADCP. Se cuenta con 773 transectas relevadas con ADCP entre 2012 y 2017, suministradas por la CARU.

Se procesa la totalidad de las transectas utilizando el software RiverSurveyor Live para ADCP Sontek. Se obtiene de esto, descartando las transectas con errores, 741 mediciones en formato SonTek ".mat". Estas transectas se procesan utilizando el software Velocity Mapping Toolbox (VMT) del USGS (Parsons et al., 2013). El procesamiento con el VMT permite unificar las transectas correspondientes a una misma campaña de medición en una misma sección del río. Varios de los archivos SonTek ".mat" se descartan porque no se pueden abrir (faltan datos de GPS o contiene otros errores), la ubicación es incorrecta (los datos de GPS indican que están en tierra), o la transecta es poco extensa o corresponde a una medición con ADCP fijo.

De este procesamiento se obtienen en total 278 transectas compuestas. Para cada transecta se genera un archivo "kmz" que se incorpora en un SIG, de modo de verificar la ubicación espacial de la misma. En base a esto, se descartan varias mediciones, teniendo finalmente 126 transectas compuestas en el área de estudio (45 % del número original). Estas transectas se agrupan en función de su ubicación espacial, identificando 11 grupos con 25 subgrupos. Los grupos responden a zonas de unos 5 a 10 km de extensión en el río donde se cuenta con relevamientos, mientras que los subgrupos corresponden a secciones específicas donde se repiten sistemáticamente las mediciones, o que cuentan con mediciones aisladas. De la figura 3.1 a la 3.11 se presenta la ubicación de los grupos.

De la figura 3.12 a la 3.28 se presentan los gráficos de los perfiles de velocidad en planta para los distintos grupos, los relevamientos de la batimetría de la sección transversal asociados a cada medición, y los estadísticos de velocidad y profundidad máxima, media y mínima.

Figura 3.1: Ubicación de transectas para km 348 del río. Este grupo contiene 10 transectas relevadas entre el 6/12/16 y el 6/12/17.

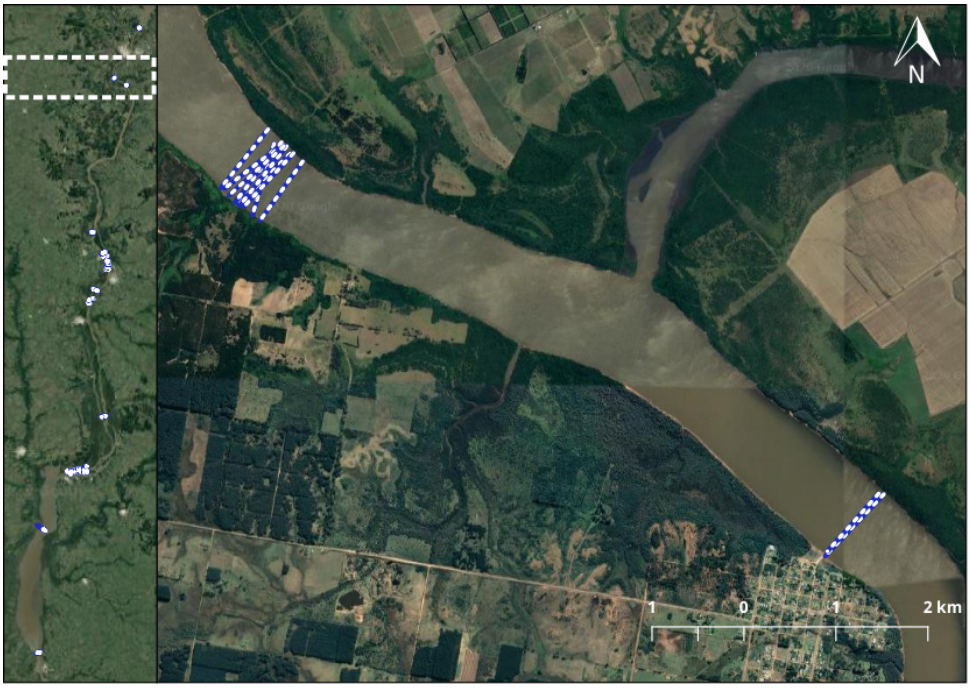


Figura 3.2: Ubicación de transectas para km 317 y km 312 del río. El grupo para el km 317 contiene 10 transectas relevadas entre el 4/1/17 y el 7/12/17, mientras que el del 312 contiene 2 relevadas entre el 28/6/17 y el 14/12/17.

Figura 3.3: Ubicación de transectas para km 230 del río. Este grupo contiene 11 transectas relevadas entre el 4/1/17 y el 7/12/17.

Figura 3.4: Ubicación de transectas para km 220 y km 218 del río. El grupo para el km 220 contiene 4 transectas relevadas entre el 5/8/15 y el 15/6/17, mientras que el km 218 contiene 2 transectas relevadas el 29/6/17.

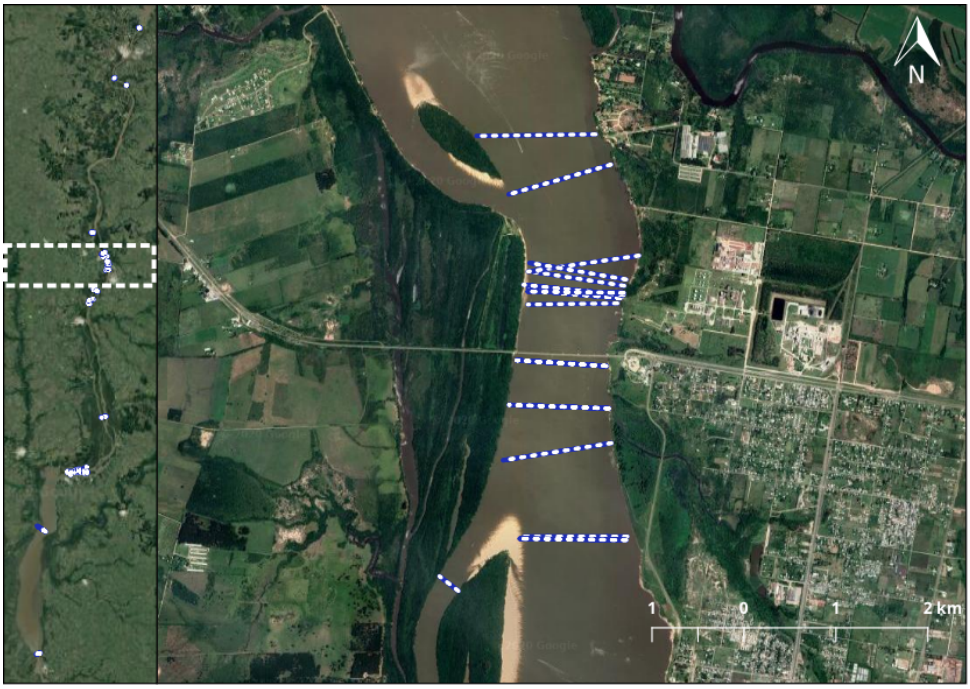


Figura 3.5: Ubicación de transectas para km 215, km 214, km 213 y km 212 del río. El grupo del km 215 contiene 2 transectas relevadas 3/10/17, el km 214 contiene 9 relevadas entre el 31/3/15 y el 14/12/17, el km 213 contiene 3 relevadas el 3/10/17, el km 212 contiene 2 relevadas entre el 20/5/15 y el 3/10/17 y el km 211 tiene una transecta relevada el 20/5/15.

Figura 3.6: Ubicación de transectas para km 200. Este grupo contiene 5 transectas relevadas el 25/3/15.

Figura 3.7: Ubicación de transectas para km 194 y km 192 del río. El grupo del km 194 contiene 3 transectas relevadas el 25/3/15, mientras que el km 192 contiene una relevada en la misma fecha.

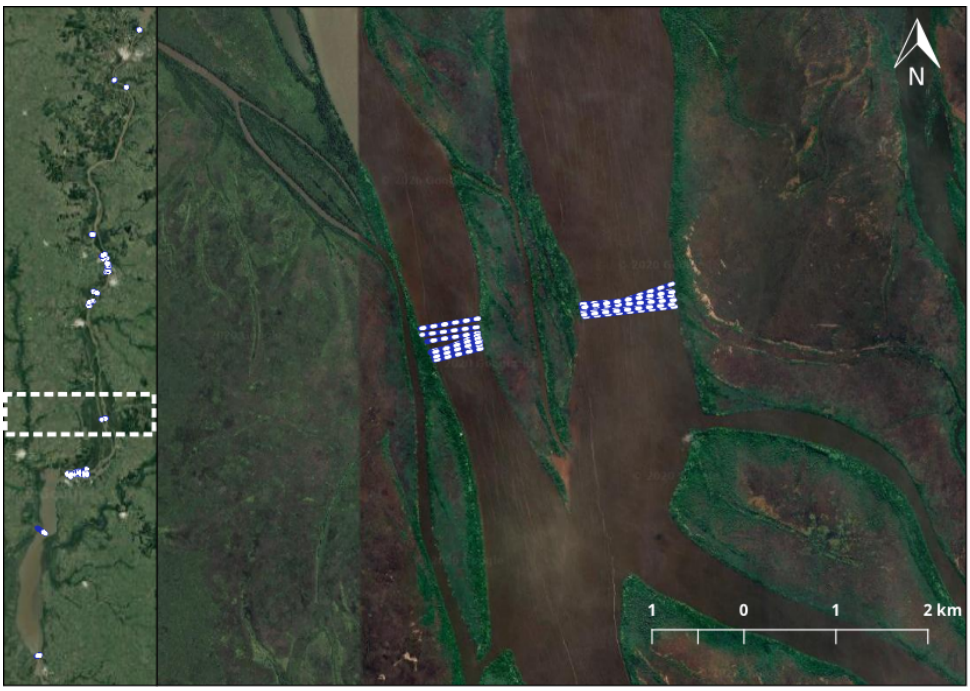


Figura 3.8: Ubicación de transectas para km 140 del río. Este grupo contiene 22 transectas, 11 en cada uno de los brazos, relevadas entre el 7/12/16 y el 7/12/17.

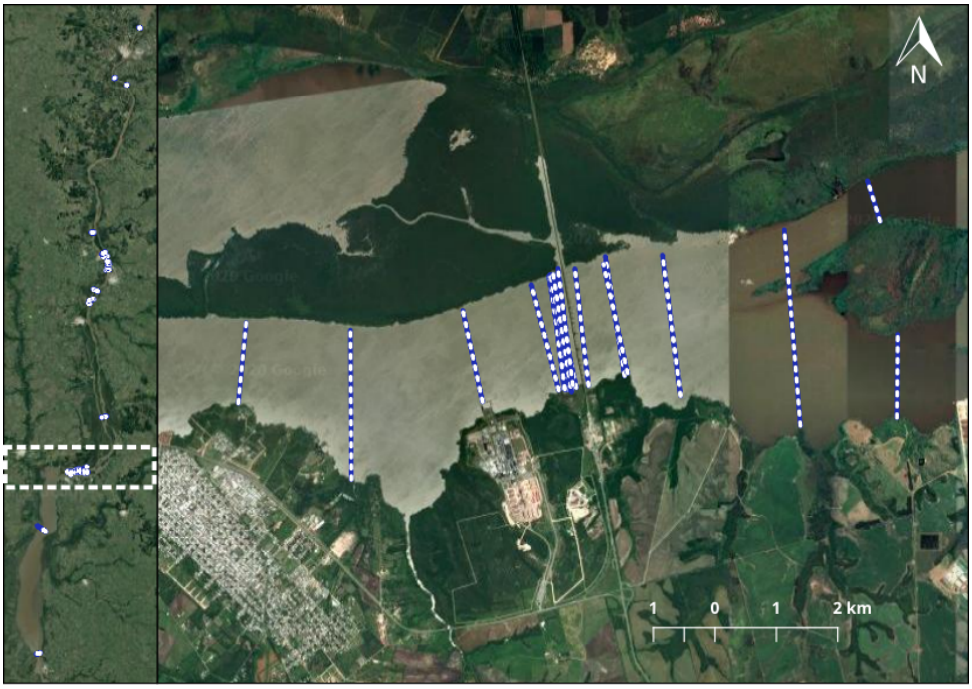


Figura 3.9: Ubicación de transectas para km 110, km 108, km 106,5, km 106, km 105, km 104, km 102 y km 100,5 del río. El grupo del km 110 contiene 2 transectas relevadas el 10/10/17, el km 108 contiene 1 relevada esa misma fecha, así como el km 106,5, el km 104, el km 102 y el km 100,5. El km 106 contiene 3 transectas relevadas entre el 10/10/17 y el 15/12/17, mientras que el km 105 contiene 23 transectas relevadas entre el 25/11/14 y el 10/10/17.

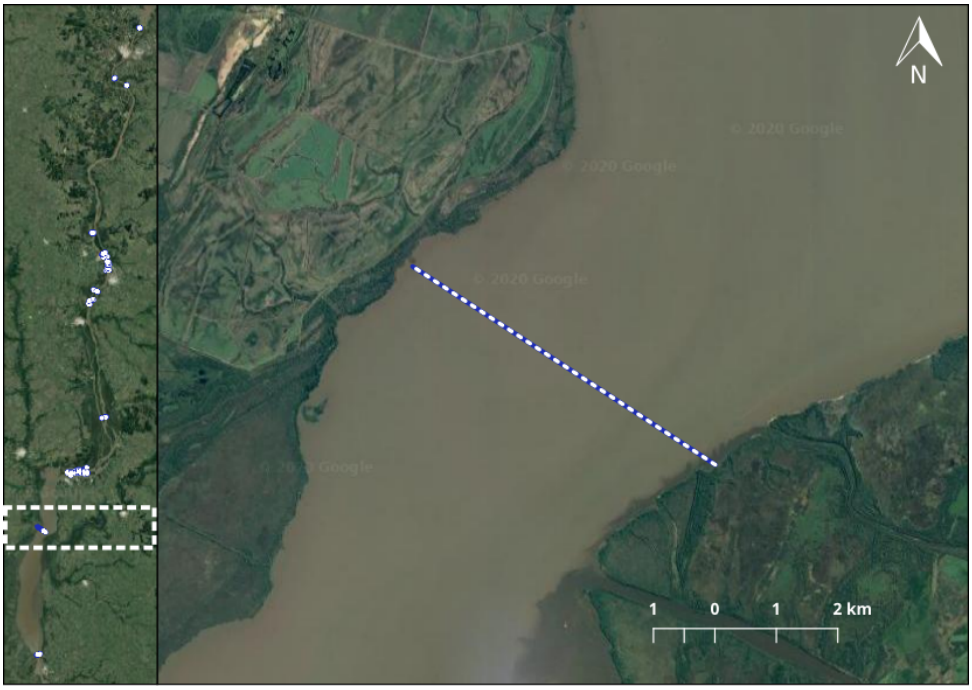


Figura 3.10: Ubicación de transectas para km 68 del río. Este grupo contiene 1 transecta relevada el 8/3/17.

Figura 3.11: Ubicación de transectas para km 9 del río. Este grupo contiene 5 transectas relevadas entre el 23/3/15 y el 3/3/16.

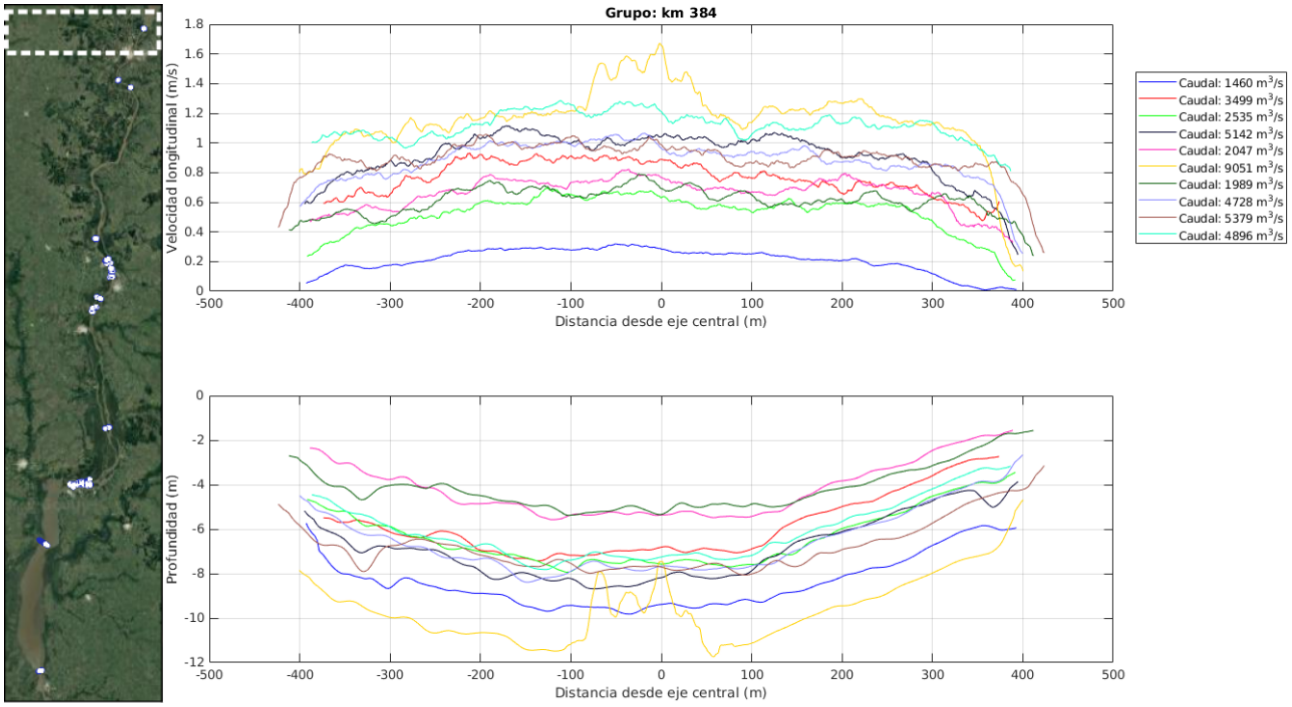


Figura 3.12: Velocidad y profundidad para km 384. Arriba: perfil en planta de velocidad promediada en vertical. Abajo: perfiles del lecho en términos de profundidad.

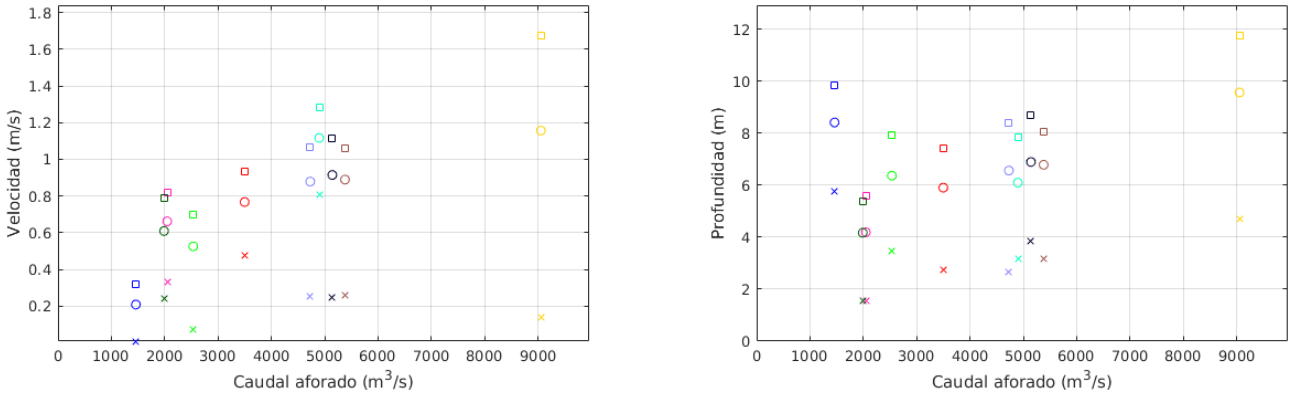


Figura 3.13: Estadísticos de velocidad y profundidad para km 348. Izquierda: mínima (×), media (○) y máxima (□) de velocidad. Derecha: mínima, media y máxima de profundidad. Los colores se corresponden con las transectas indicadas en la figura 3.12

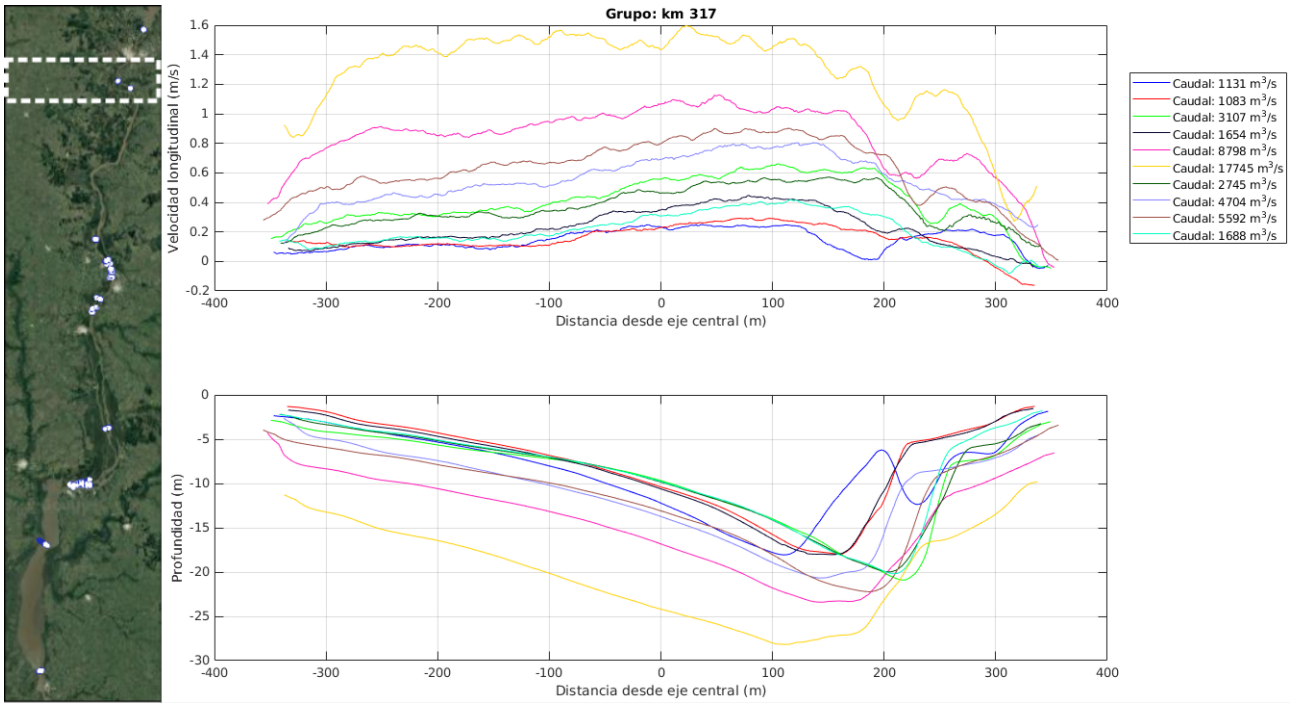


Figura 3.14: Velocidad y profundidad para km 317. Arriba: perfil en planta de velocidad promediada en vertical. Abajo: perfiles del lecho en términos de profundidad.

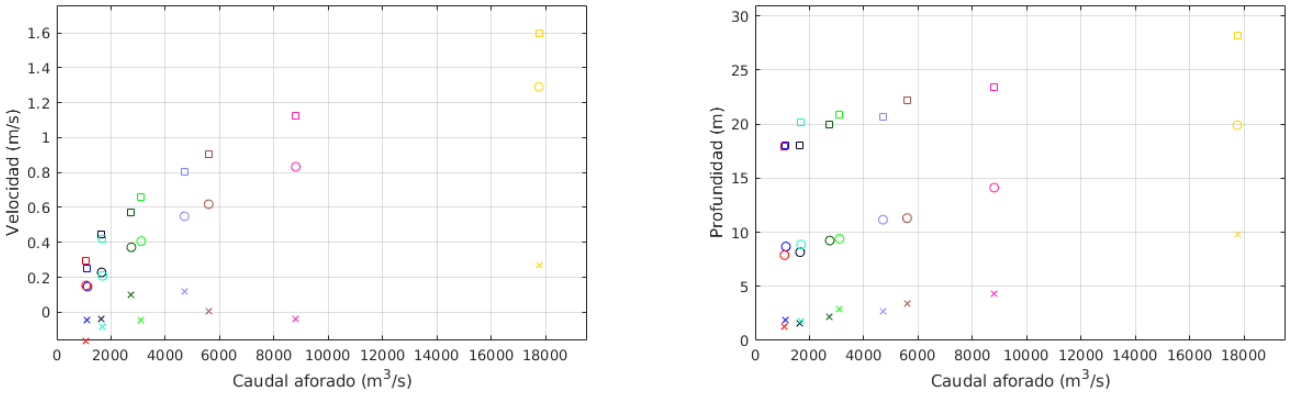


Figura 3.15: Estadísticos de velocidad y profundidad para km 317. Izquierda: mínima (×), media (○) y máxima (□) de velocidad. Derecha: mínima, media y máxima de profundidad. Los colores se corresponden con las transectas indicadas en la figura 3.14

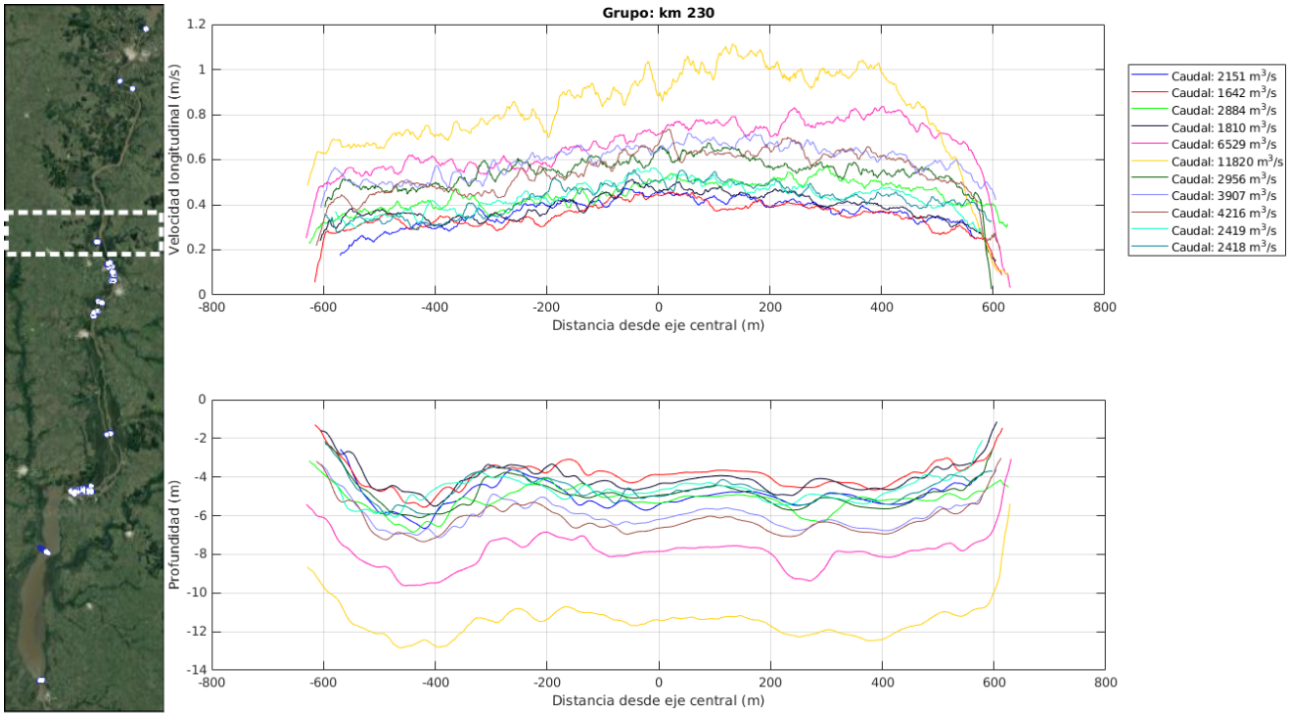


Figura 3.16: Velocidad y profundidad para km 230. Arriba: perfil en planta de velocidad promediada en vertical. Abajo: perfiles del lecho en términos de profundidad.

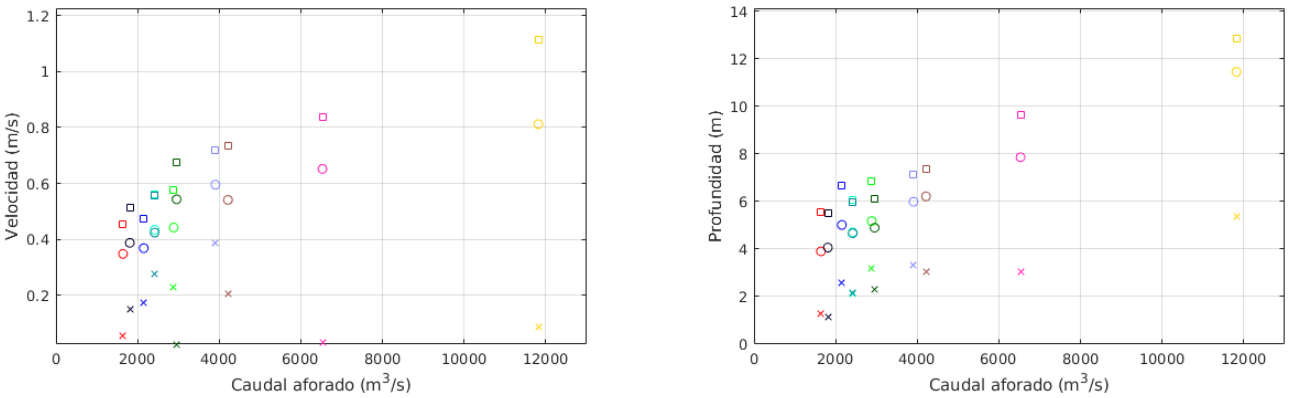


Figura 3.17: Estadísticos de velocidad y profundidad para km 230. Izquierda: mínima (×), media (○) y máxima (□) de velocidad. Derecha: mínima, media y máxima de profundidad. Los colores se corresponden con las transectas indicadas en la figura 3.16

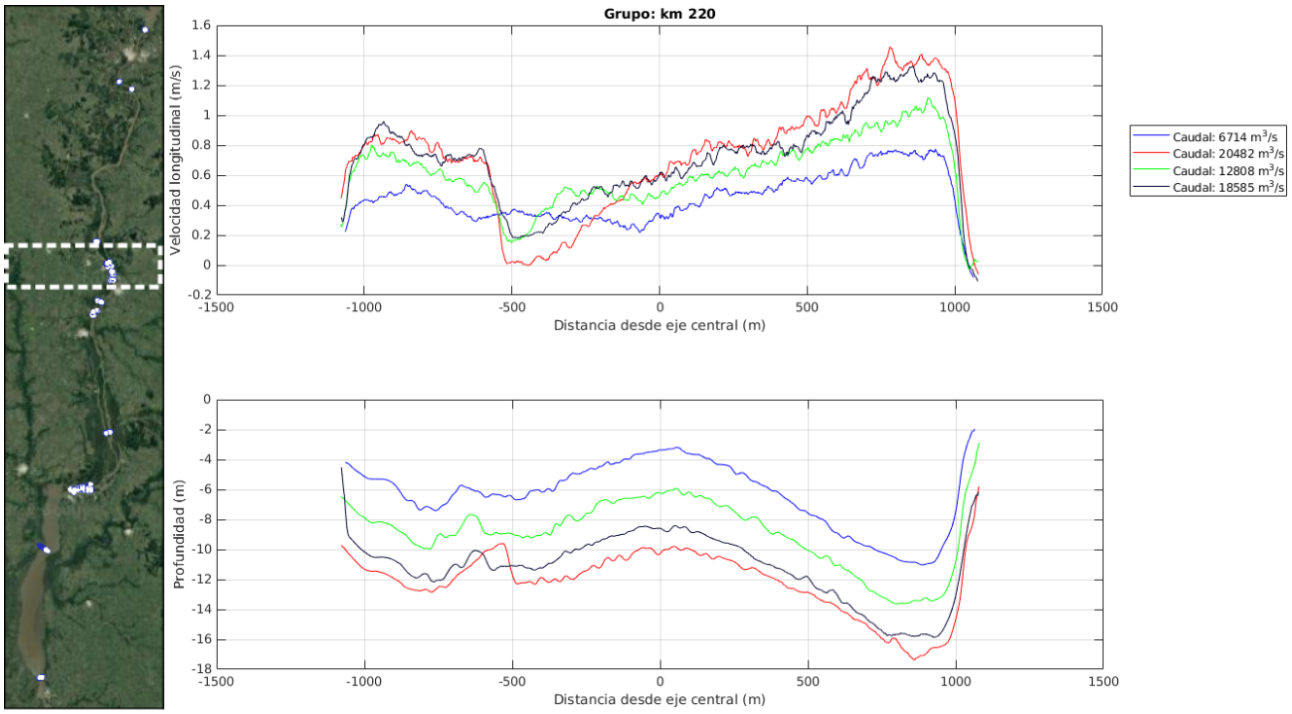


Figura 3.18: Velocidad y profundidad para km 220. Arriba: perfil en planta de velocidad promediada en vertical. Abajo: perfiles del lecho en términos de profundidad.

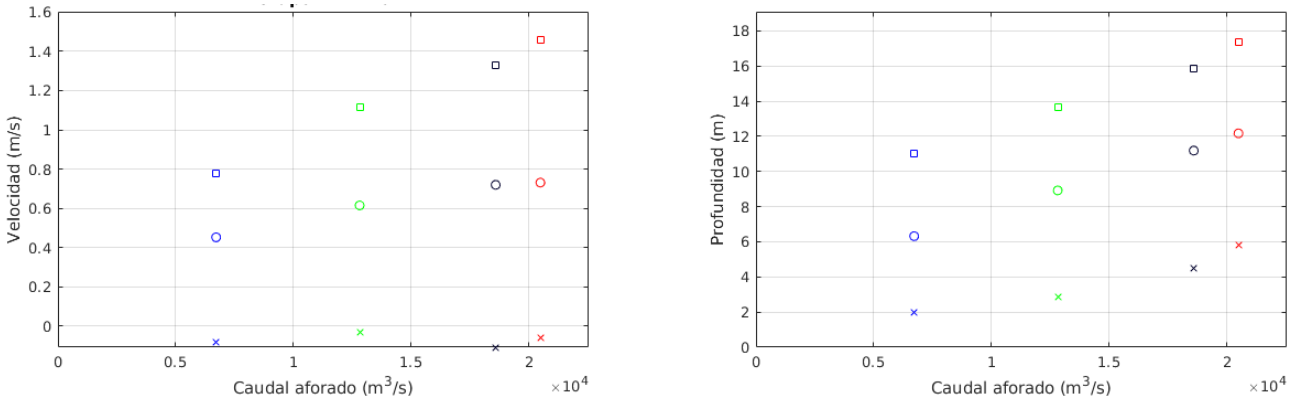


Figura 3.19: Estadísticos de velocidad y profundidad para km 220. Izquierda: mínima (×), media (○) y máxima (□) de velocidad. Derecha: mínima, media y máxima de profundidad. Los colores se corresponden con las transectas indicadas en la figura 3.18

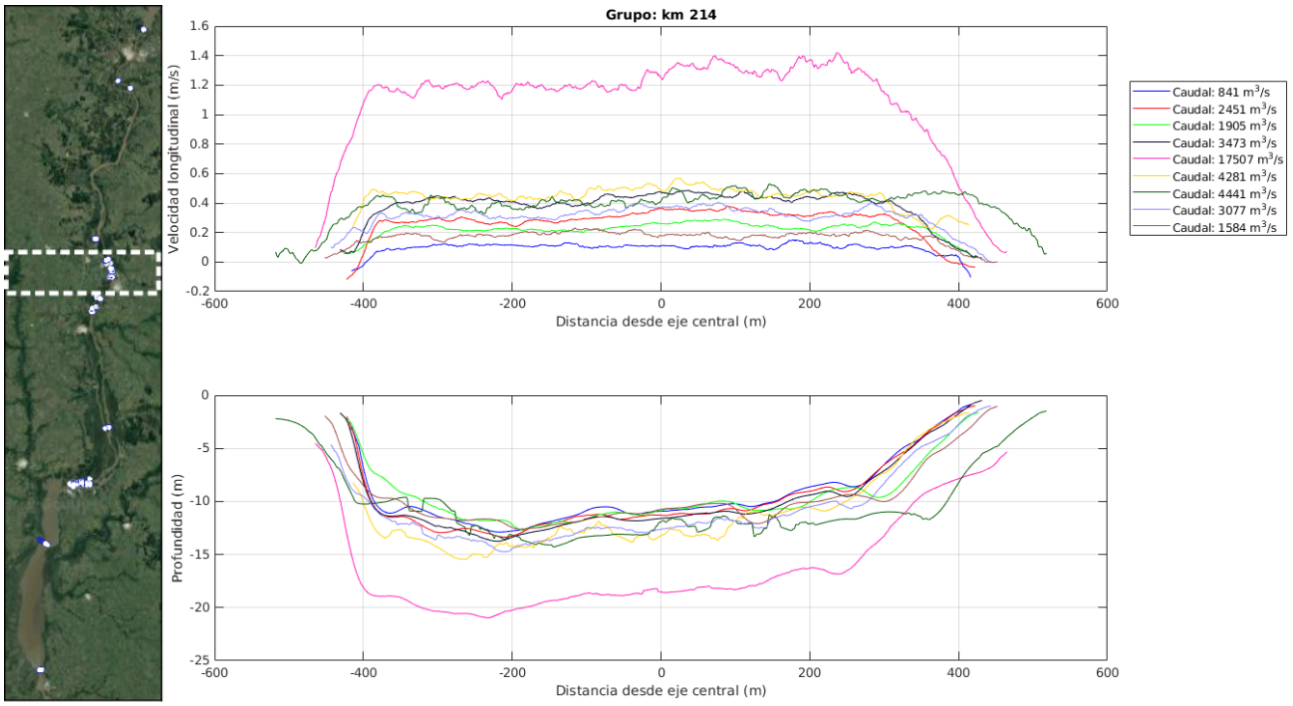


Figura 3.20: Velocidad y profundidad para km 214. Arriba: perfil en planta de velocidad promediada en vertical. Abajo: perfiles del lecho en términos de profundidad.

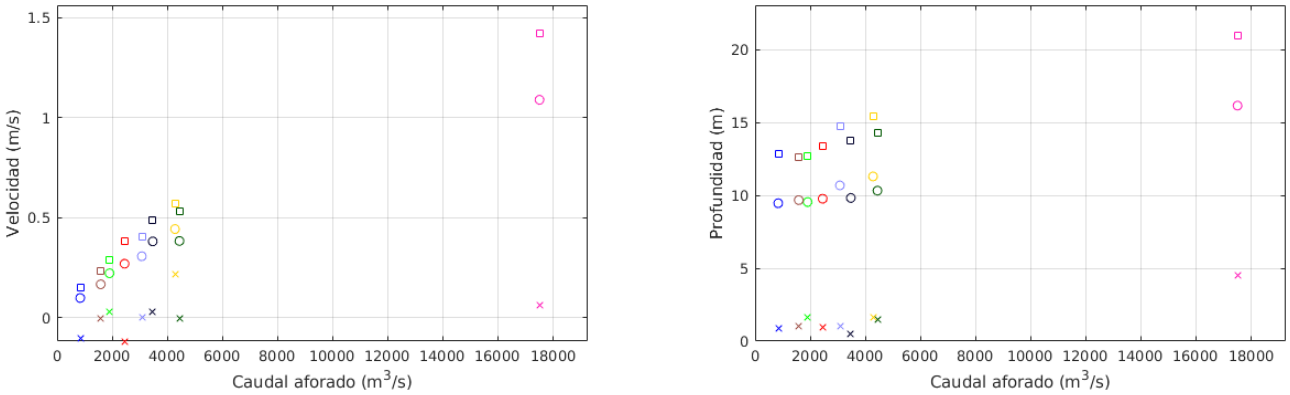


Figura 3.21: Estadísticos de velocidad y profundidad para km 214. Izquierda: mínima (×), media (○) y máxima (□) de velocidad. Derecha: mínima, media y máxima de profundidad. Los colores se corresponden con las transectas indicadas en la figura 3.20

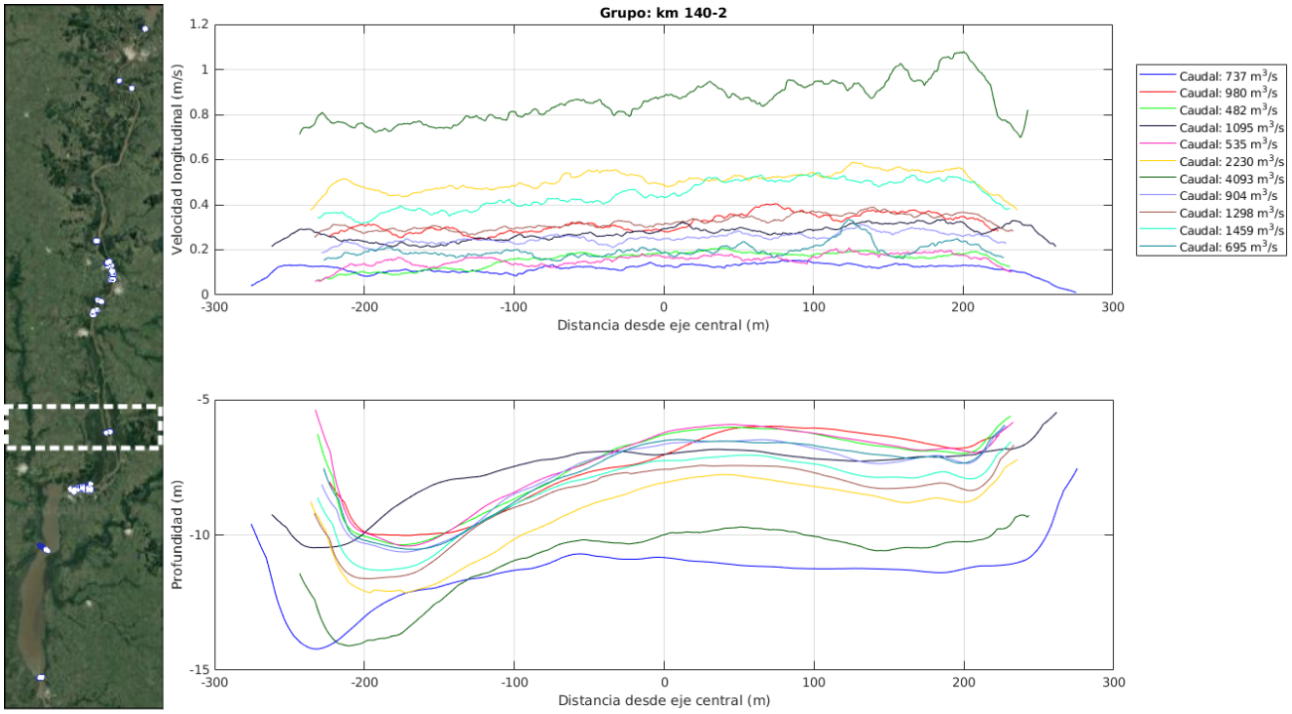


Figura 3.22: Velocidad y profundidad para km 140-2. Arriba: perfil en planta de velocidad promediada en vertical. Abajo: perfiles del lecho en términos de profundidad.

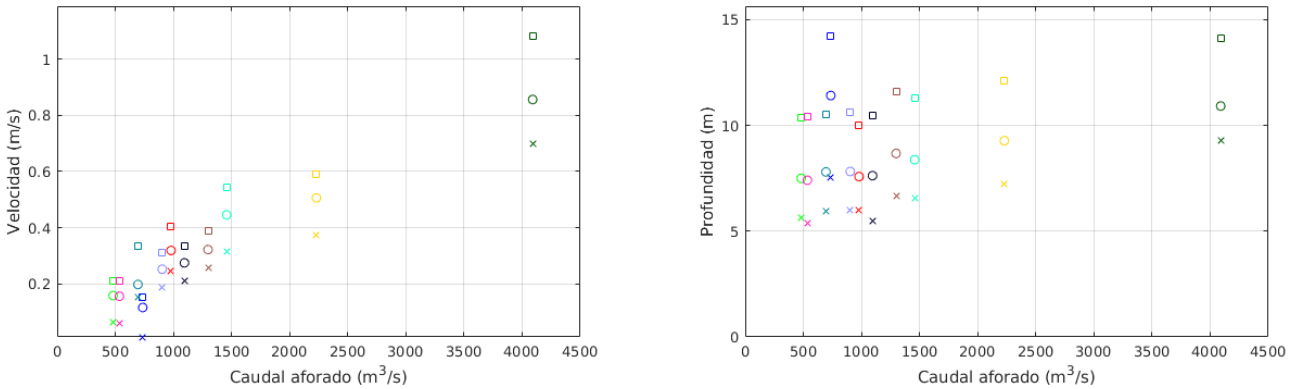


Figura 3.23: Estadísticos de velocidad y profundidad para km 140-2. Izquierda: mínima (×), media (○) y máxima (□) de velocidad. Derecha: mínima, media y máxima de profundidad. Los colores se corresponden con las transectas indicadas en la figura 3.22

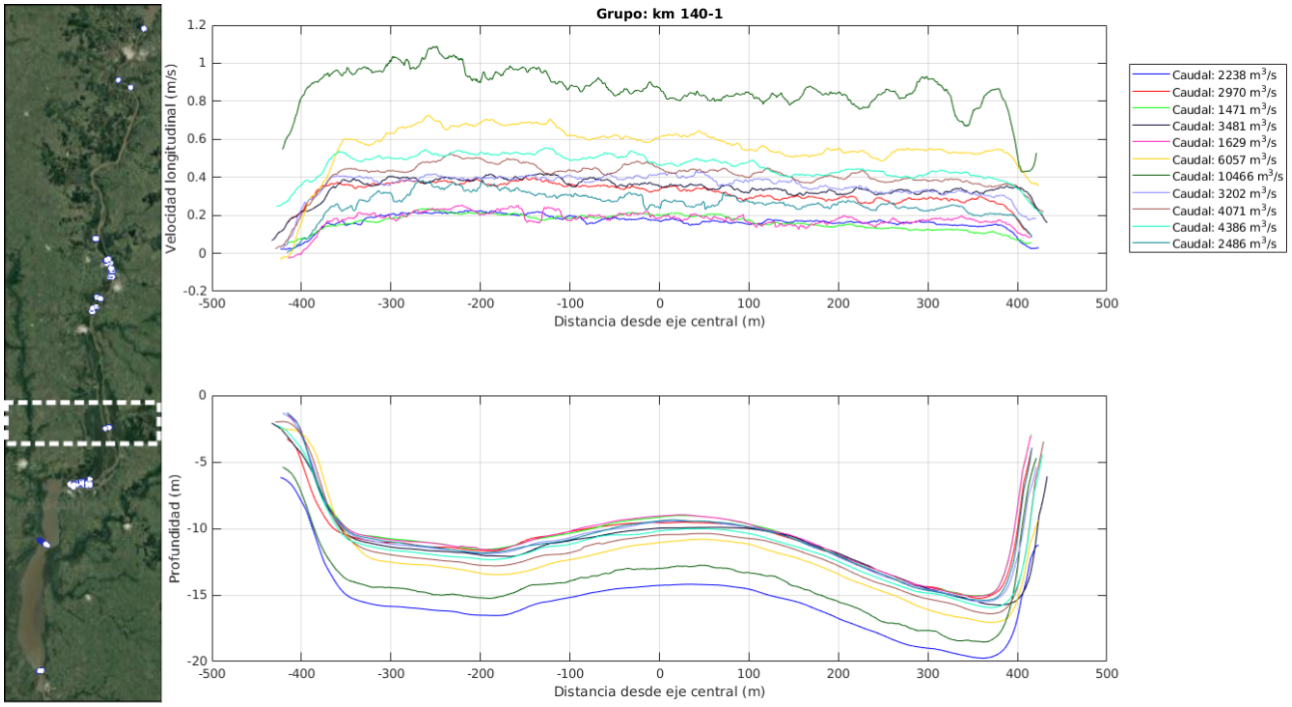


Figura 3.24: Velocidad y profundidad para km 140-1. Arriba: perfil en planta de velocidad promediada en vertical. Abajo: perfiles del lecho en términos de profundidad.

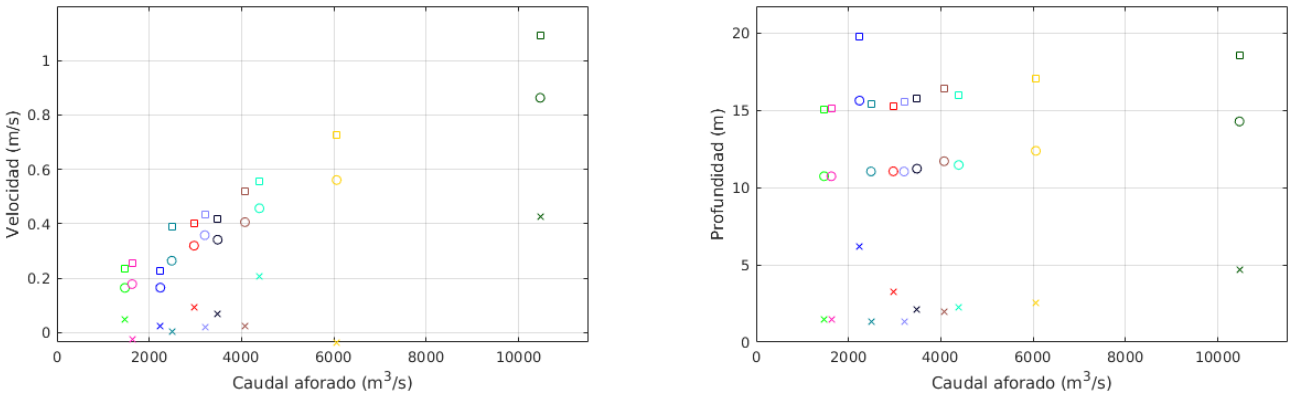


Figura 3.25: Estadísticos de velocidad y profundidad para km 140-1. Izquierda: mínima (×), media (○) y máxima (□) de velocidad. Derecha: mínima, media y máxima de profundidad. Los colores se corresponden con las transectas indicadas en la figura 3.24

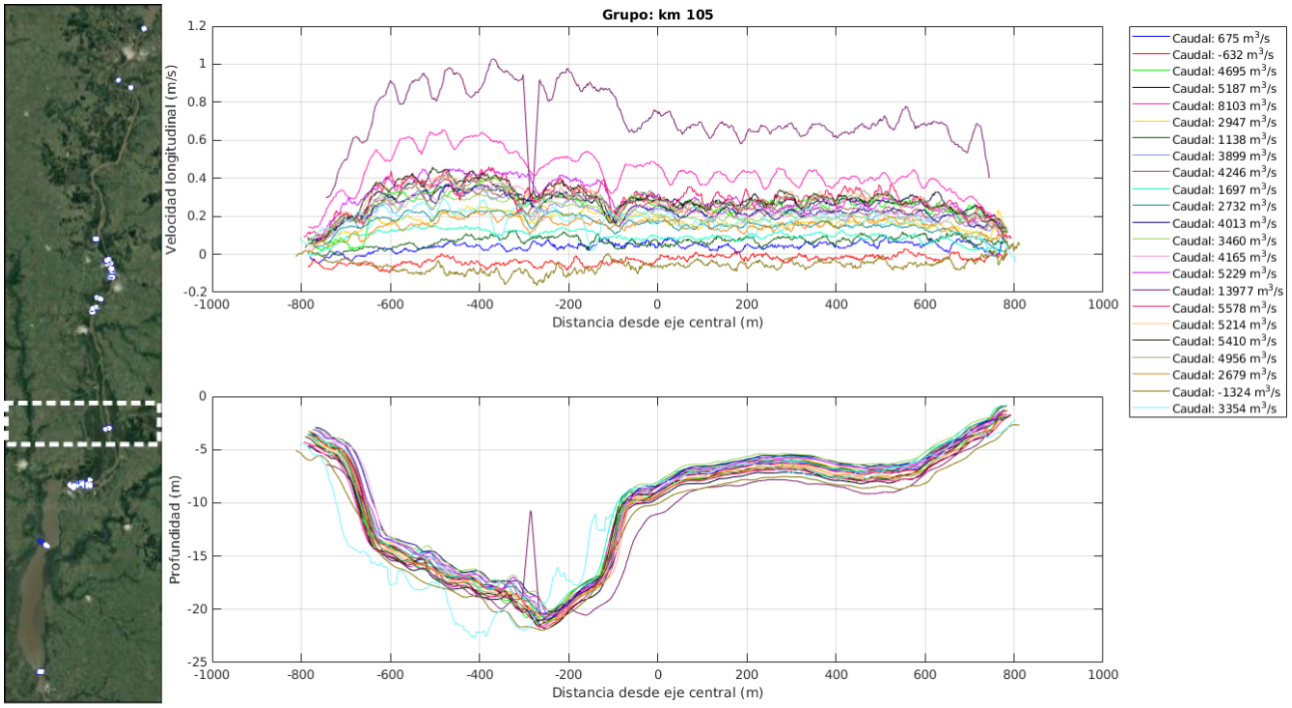


Figura 3.26: Velocidad y profundidad para km 105. Arriba: perfil en planta de velocidad promediada en vertical. Abajo: perfiles del lecho en términos de profundidad.

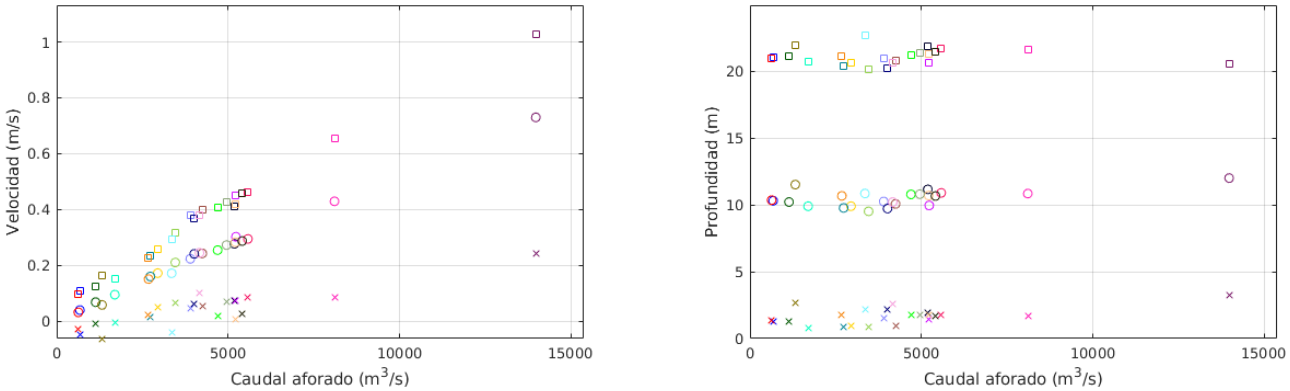


Figura 3.27: Estadísticos de velocidad y profundidad para km 105. Izquierda: mínima (×), media (∘) y máxima (□) de velocidad. Derecha: mínima, media y máxima de profundidad. Los colores se corresponden con las transectas indicadas en la figura 3.26

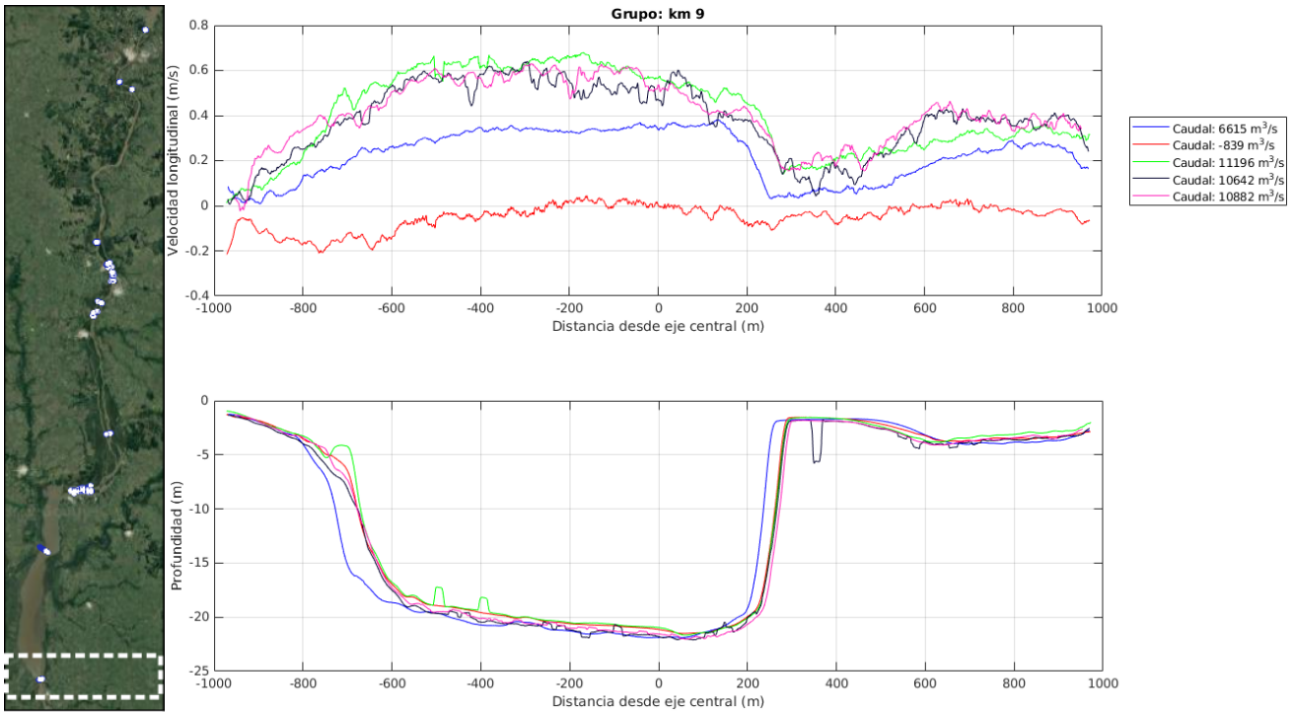


Figura 3.28: Velocidad y profundidad para km 009. Arriba: perfil en planta de velocidad promediada en vertical. Abajo: perfiles del lecho en términos de profundidad.

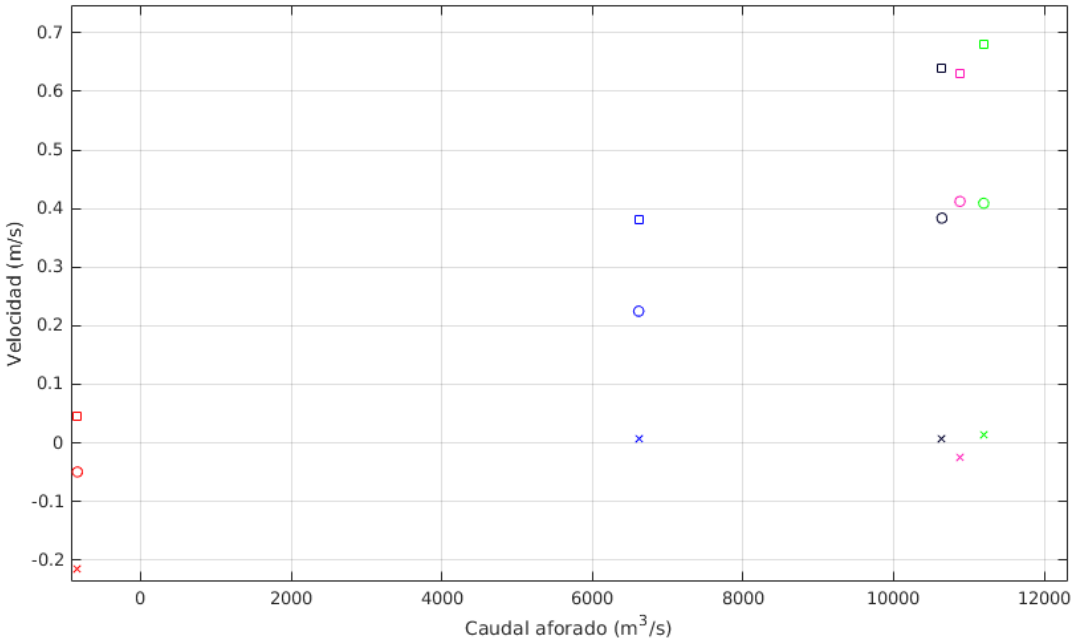


Figura 3.29: Estadísticos de velocidad y profundidad para km 009. Izquierda: mínima (×), media (○) y máxima (□) de velocidad. Derecha: mínima, media y máxima de profundidad. Los colores se corresponden con las transectas indicadas en la figura 3.28

Apéndice 4

Calibración de niveles

Esta sección tiene como objetivo plasmar el trabajo realizado para la calibración del modelo hidrodinámico implementado utilizando como parámetros de calibración el coeficiente de fricción de fondo de Manning y el coeficiente de influencia del viento. Según se viera en el capítulo 5, para la calibración del coeficiente de fricción se procedió en dos etapas. La primera de ellas consistió en la calibración del coeficiente de fricción del cauce en los distintos tramos, para la cual se usaron datos de caudales bajos y medios de Salto Grande, específicamente datos desde el 1/1/2008 hasta el 1/10/2008. En estas condiciones, el flujo se mantiene dentro del cauce del río, no mojando las islas ni la planicie de inundación. La segunda consistió en la calibración del coeficiente de fricción para las islas y planicie de inundación, para lo cual se usaron datos de caudales de crecidas, específicamente entre el 15/10/2008 y el 20/11/2008. Luego de esto se calibró el coeficiente de influencia del viento con datos de forzates desde el 1/9/2008 hasta el 31/12/2008.

A continuación se presentan los resultados obtenidos para cada estación considerada así como los indicadores globales de cada corrida de calibración realizada.

4.1. Calibración del coeficiente de fricción del cauce

En esta sección se presentan los resultados obtenidos para la calibración del coeficiente de rozamiento de los distintos tramos del cauce. Para cada serie de niveles modelada, se realizó la comparación con la serie medida correspondiente de la siguiente forma:

- Comparación gráfica de las series medidas y modeladas.
- Diagrama de Taylor para la comparación de estadísticos.

4.1.1. Salto

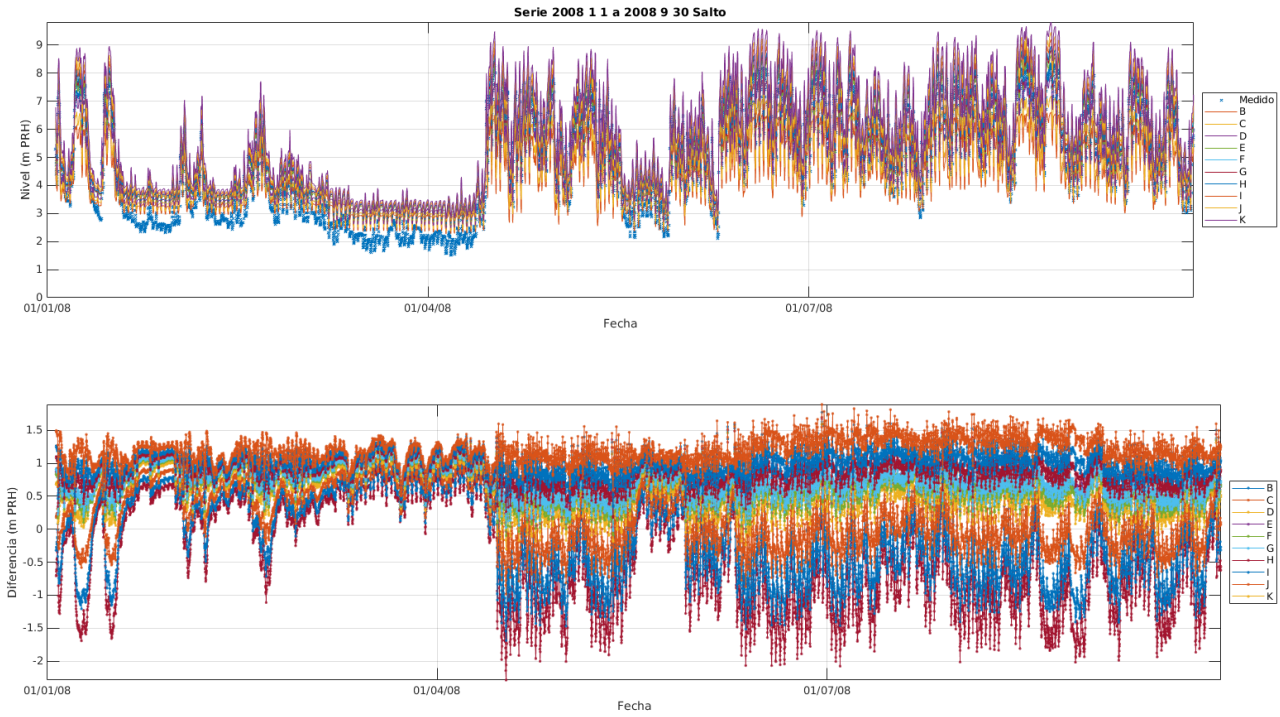


Figura 4.1: Arriba: comparación de series de niveles. Abajo: sesgo. - Salto.

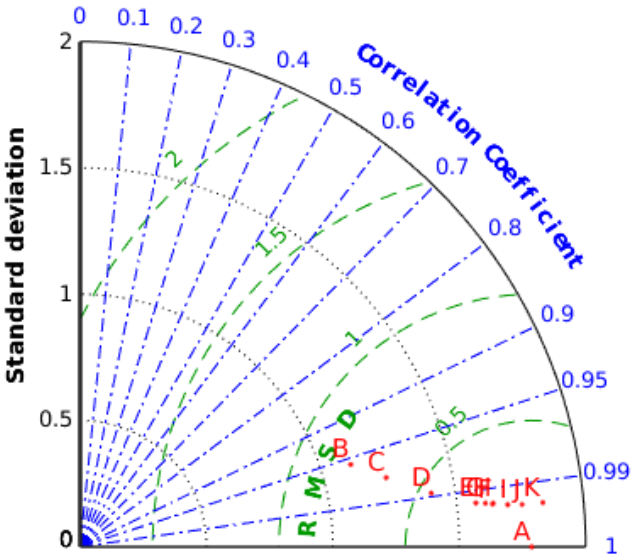


Figura 4.2: Diagrama de Taylor - Salto.

4.1.2. Concordia

Figura 4.3: Arriba: comparación de series de niveles. Abajo: sesgo. - Concordia.

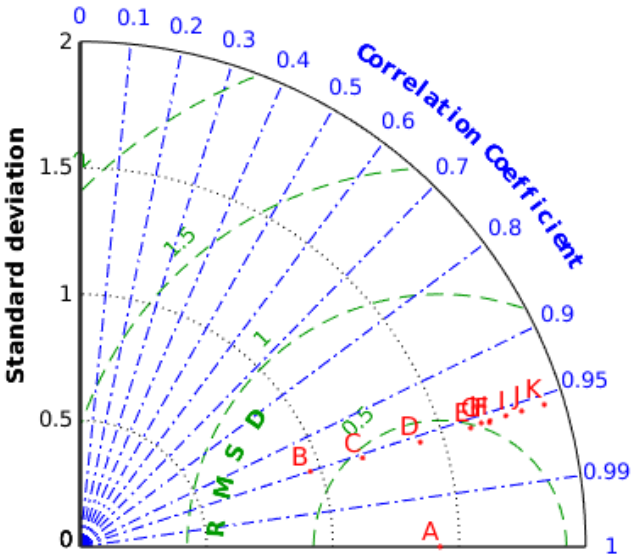


Figura 4.4: Diagrama de Taylor - Concordia.

4.1.3. Yeruá

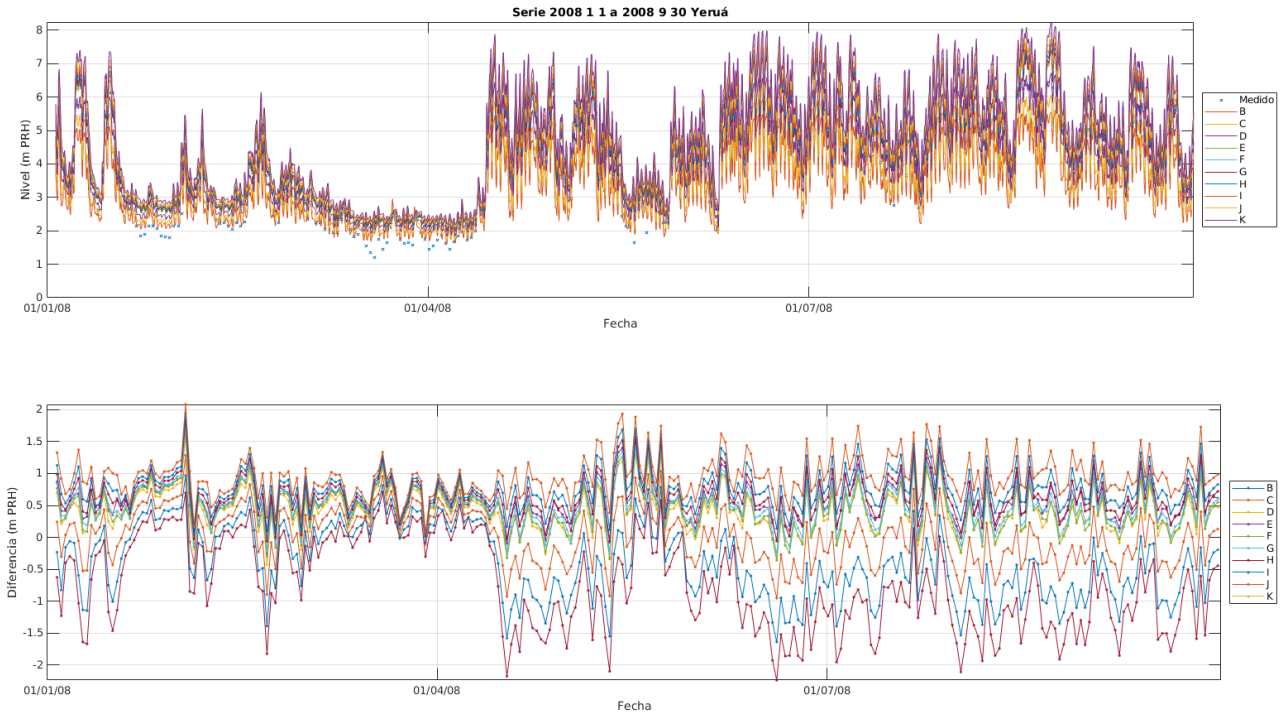


Figura 4.5: Arriba: comparación de series de niveles. Abajo: sesgo. - Yeruá.

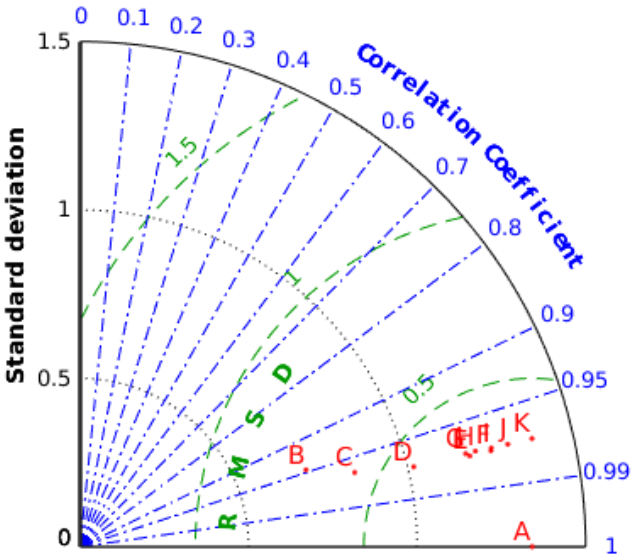


Figura 4.6: Diagrama de Taylor - Yeruá.

4.1.4. Nueva Escocia

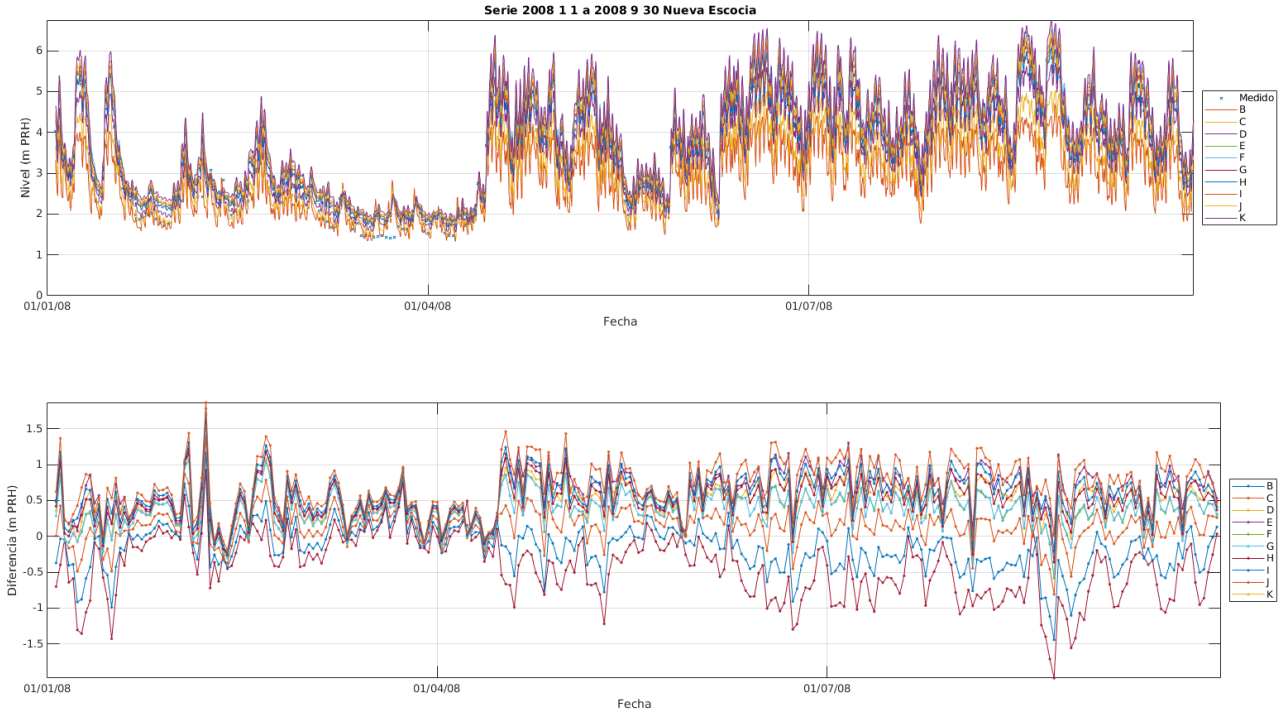


Figura 4.7: Arriba: comparación de series de niveles. Abajo: sesgo. - Nueva Escocia.

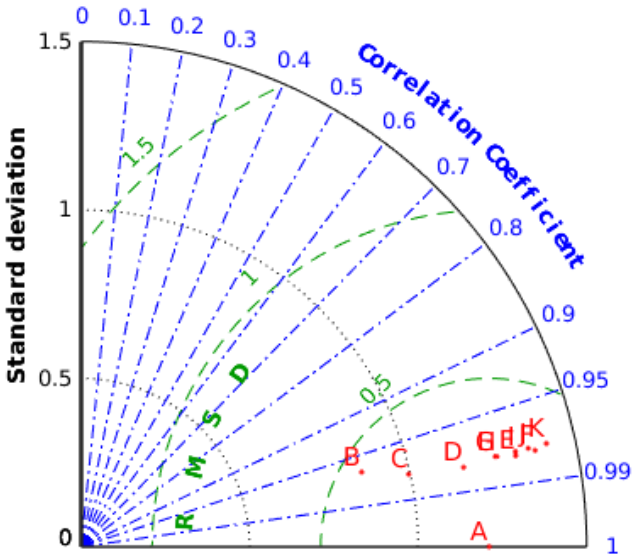


Figura 4.8: Diagrama de Taylor - Nueva Escocia.

4.1.5. La Calera

Figura 4.9: Arriba: comparación de series de niveles. Abajo: sesgo. - La Calera.

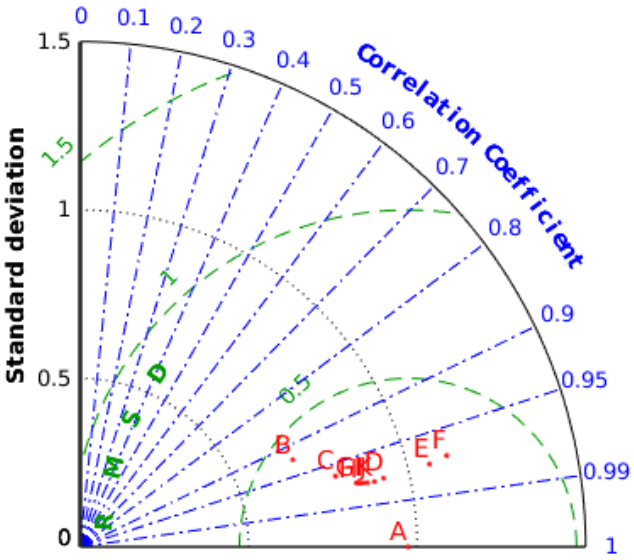


Figura 4.10: Diagrama de Taylor - La Calera.

4.1.6. Fábrica Colón

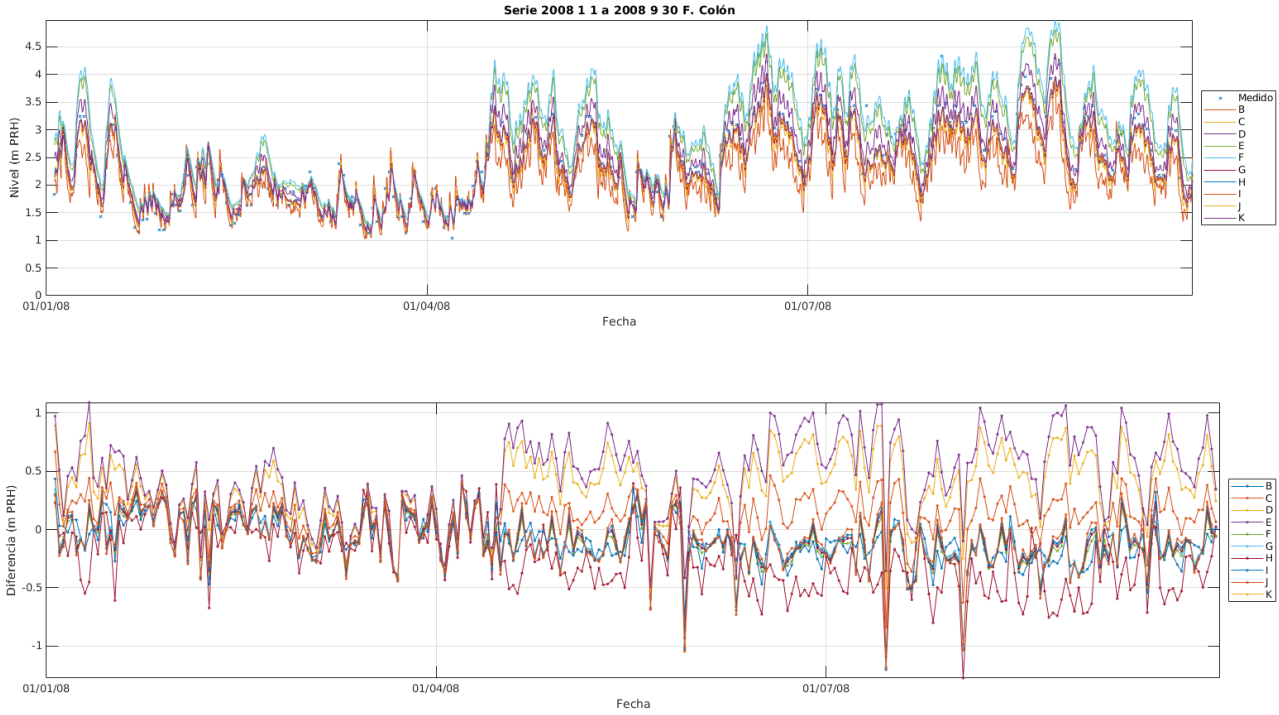


Figura 4.11: Arriba: comparación de series de niveles. Abajo: sesgo. - Fábrica Colón.

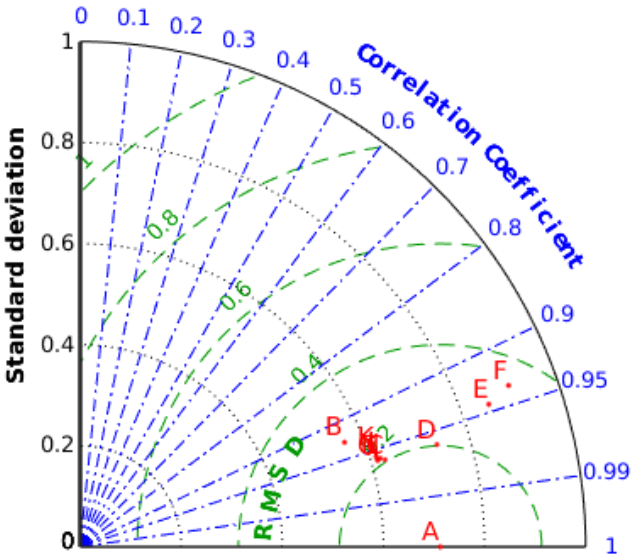


Figura 4.12: Diagrama de Taylor - Fábrica Colón.

4.1.7. Colón

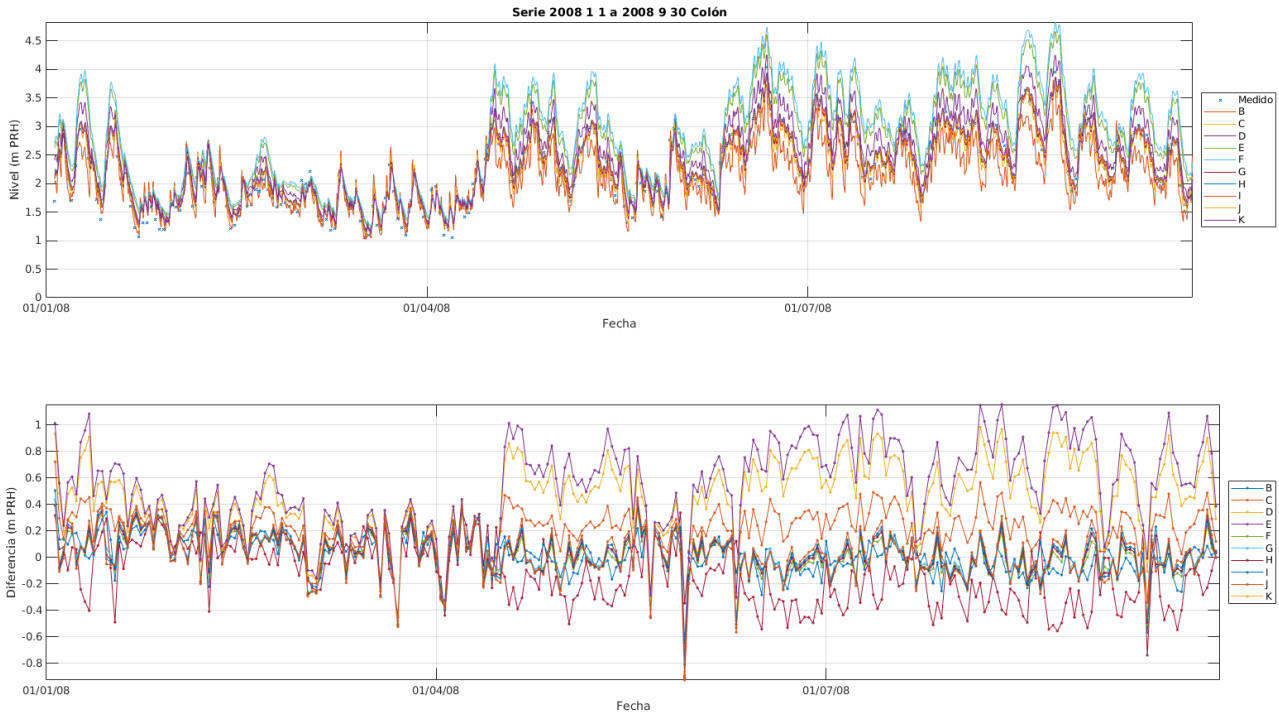


Figura 4.13: Arriba: comparación de series de niveles. Abajo: sesgo. - Colón.

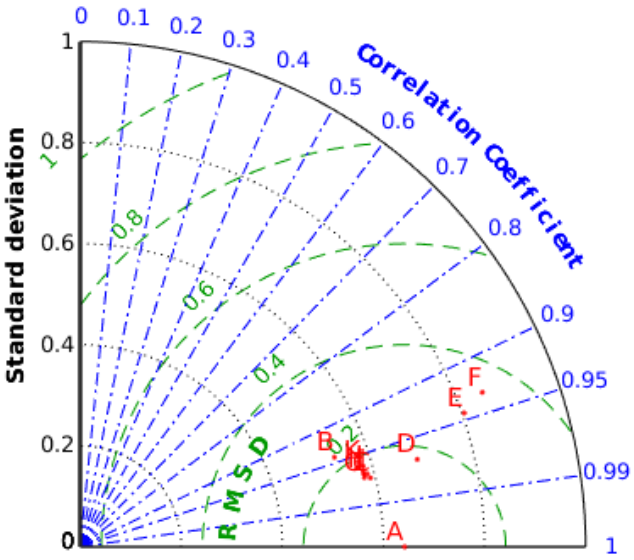


Figura 4.14: Diagrama de Taylor - Colón.

4.1.8. Paysandú

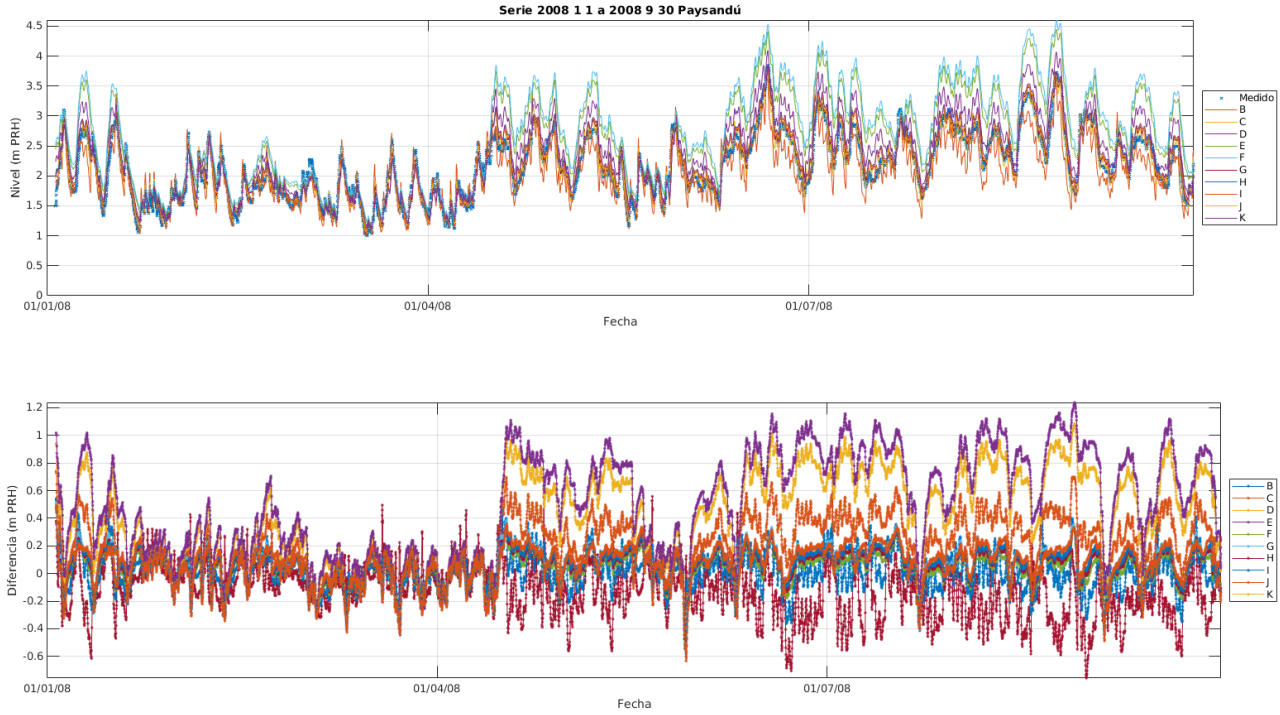


Figura 4.15: Arriba: comparación de series de niveles. Abajo: sesgo. - Paysandú.

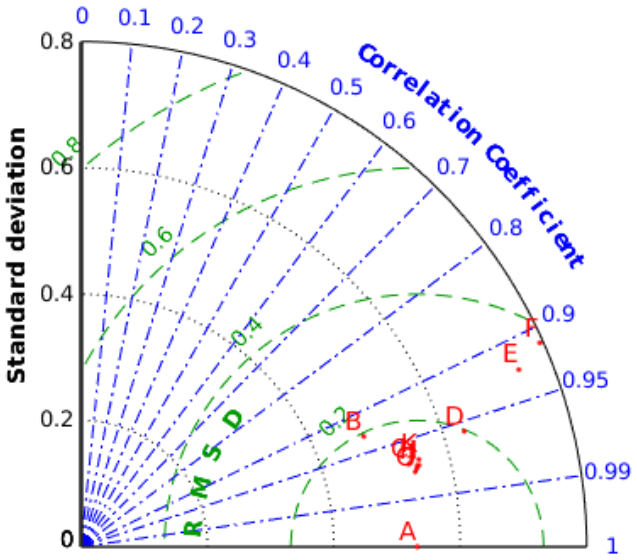


Figura 4.16: Diagrama de Taylor - Paysandú.

4.1.9. Concepción del Uruguay

Figura 4.17: Arriba: comparación de series de niveles. Abajo: sesgo. - Concepción del Uruguay.

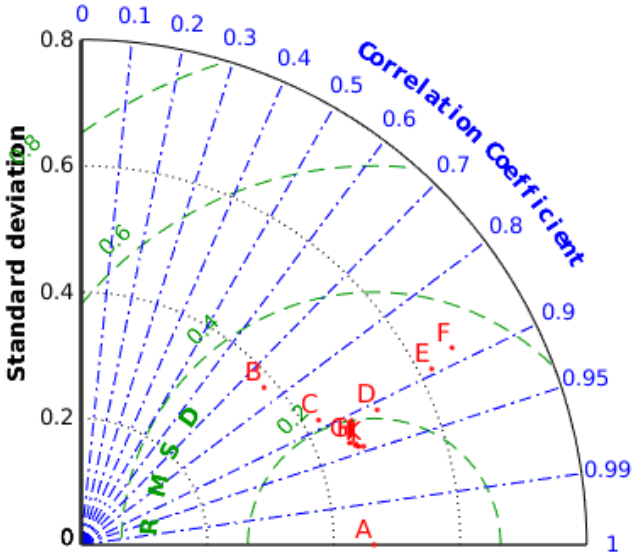


Figura 4.18: Diagrama de Taylor - Concepción del Uruguay.

4.1.10. Campichuelo

Figura 4.19: Arriba: comparación de series de niveles. Abajo: sesgo. - Campichuelo.

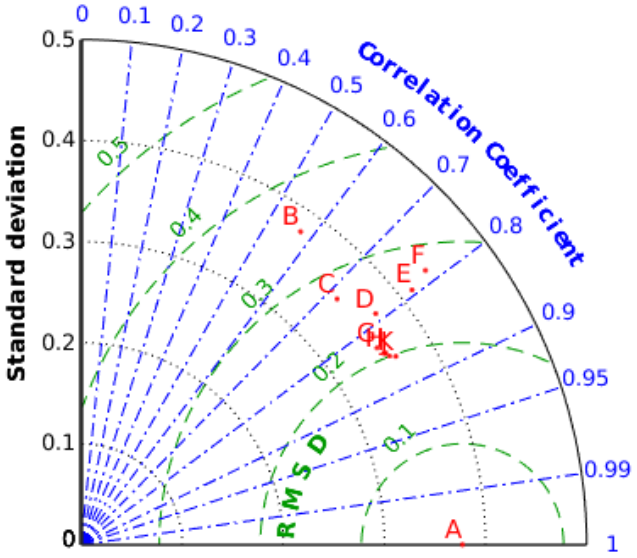


Figura 4.20: Diagrama de Taylor - Campichuelo.

4.1.11. Fray Bentos

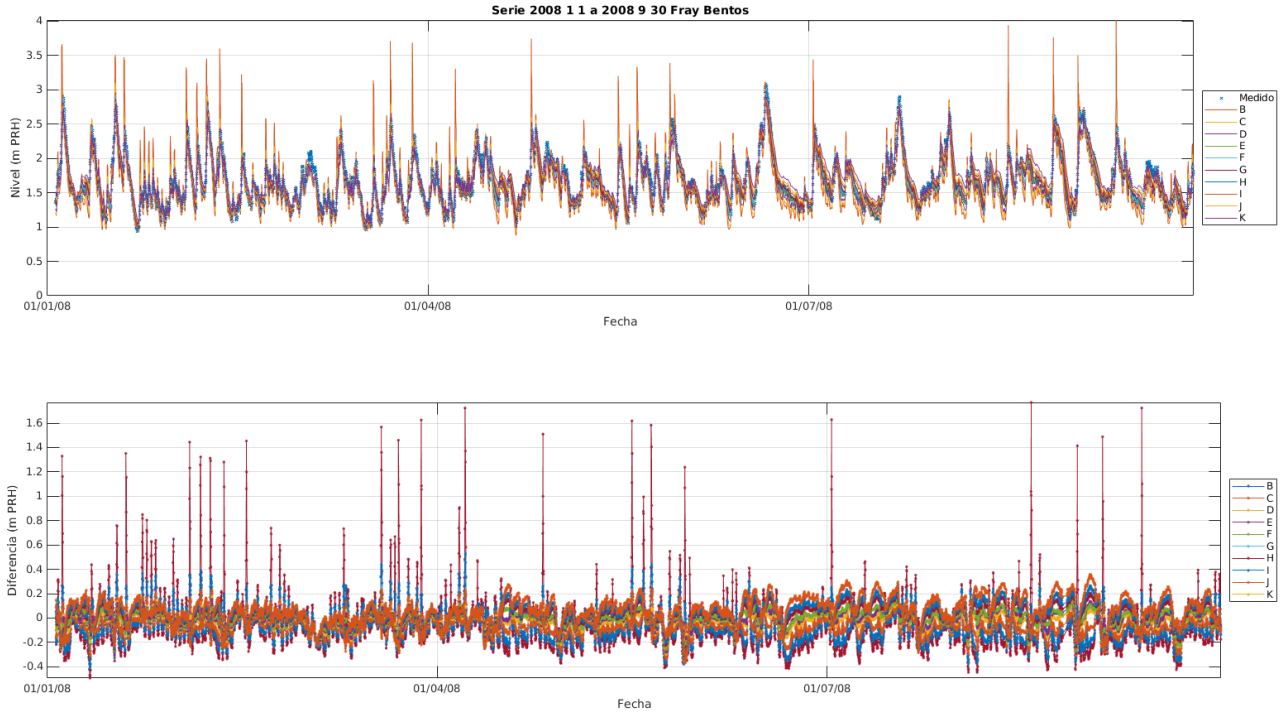


Figura 4.21: Arriba: comparación de series de niveles. Abajo: sesgo. - Fray Bentos.

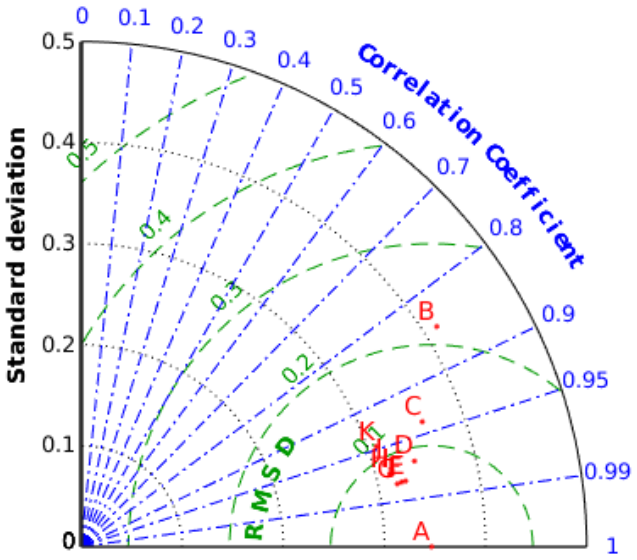


Figura 4.22: Diagrama de Taylor - Fray Bentos.

4.1.12. Gualeguaychú

Figura 4.23: Arriba: comparación de series de niveles. Abajo: sesgo. - Gualeguaychú.

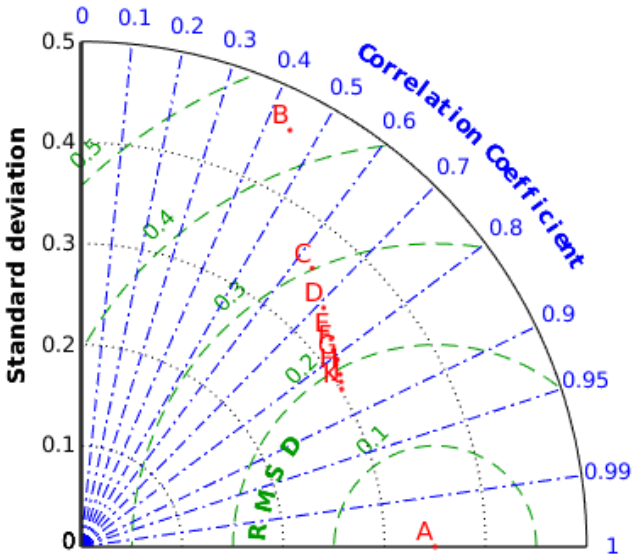


Figura 4.24: Diagrama de Taylor - Gualeguaychú.

4.1.13. Nueva Palmira

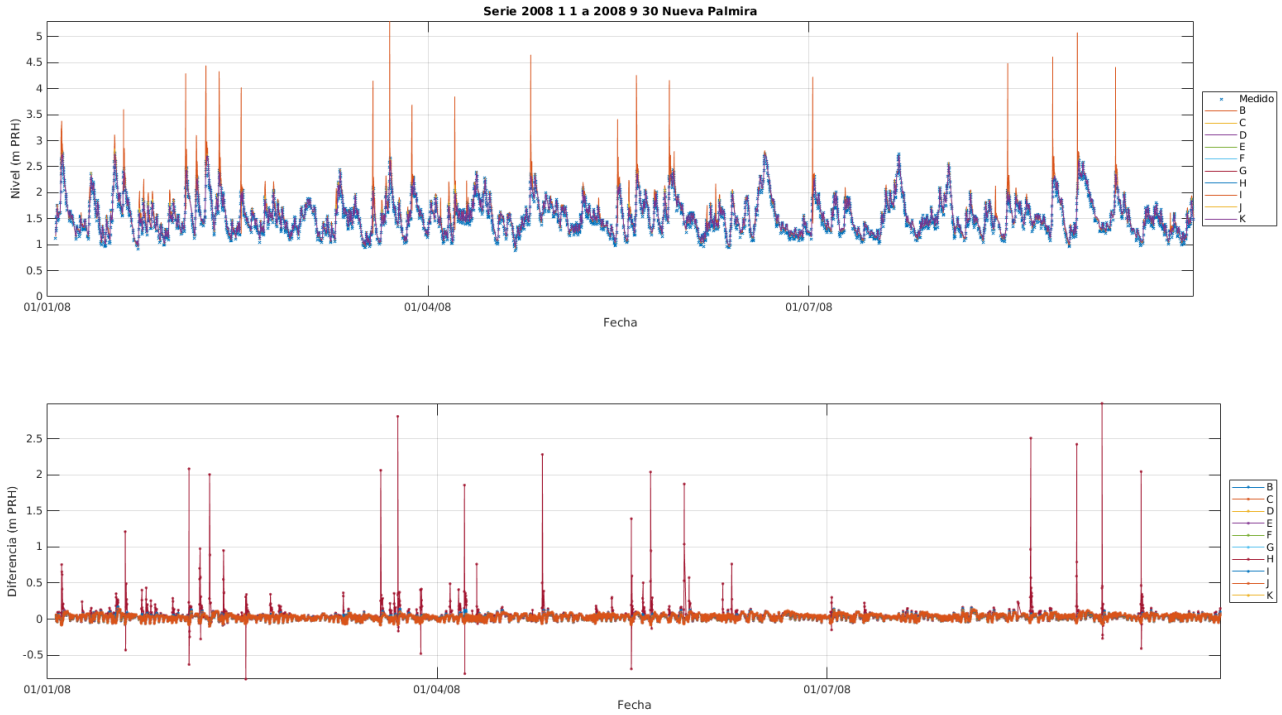


Figura 4.25: Arriba: comparación de series de niveles. Abajo: sesgo. - Nueva Palmira.

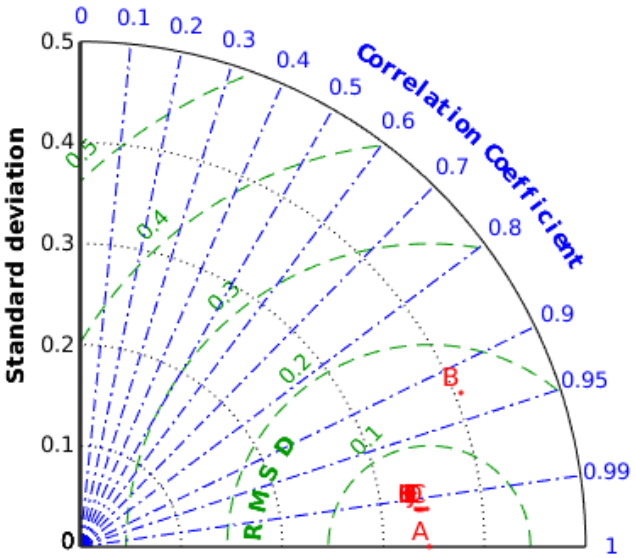


Figura 4.26: Diagrama de Taylor - Nueva Palmira.

4.1.14. Indicadores

En esta sección se presentan los parámetros indicadores utilizados, tanto por estación como globales, para determinar el ajuste del modelo a las series medidas. A saber: error RMS,

coeficiente de correlación, sesgo e $IND = (ERMS + abs(SESGO))/(CORCOEF \times STD)$.

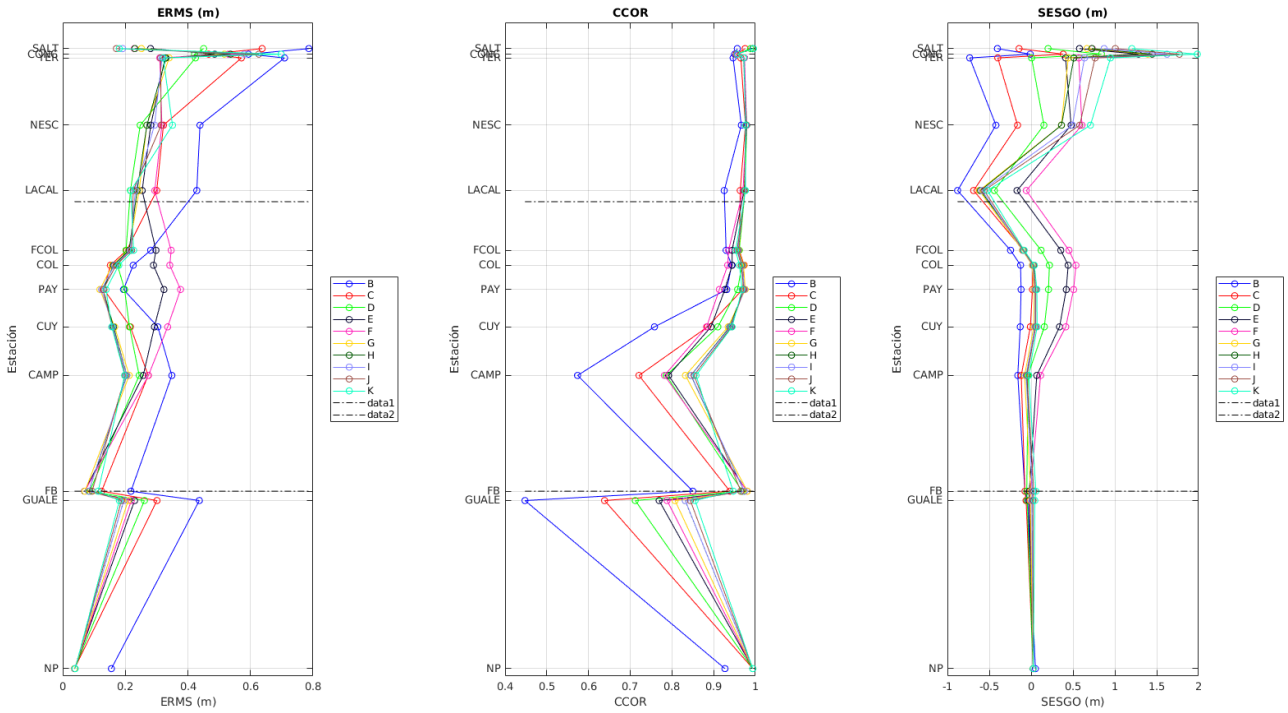


Figura 4.27: Error RMS, coeficiente de correlación y sesgo para cada estación por corrida.

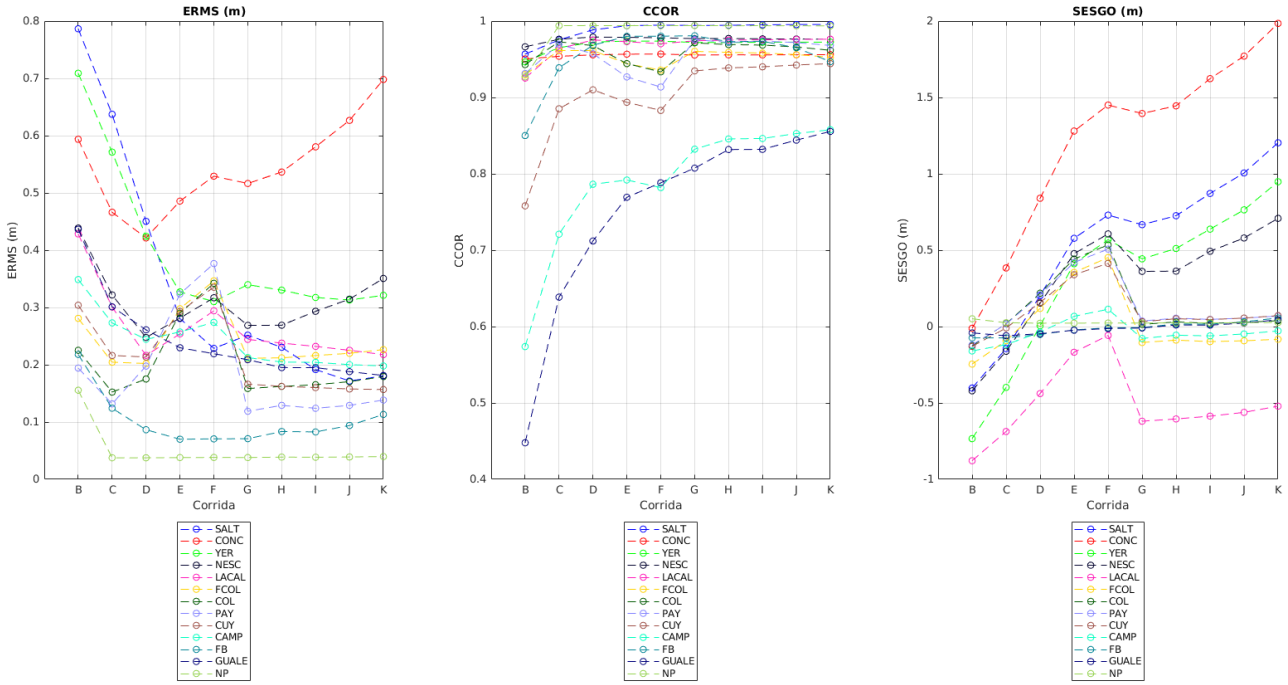


Figura 4.28: Error RMS, coeficiente de correlación y sesgo para cada corrida por estación.

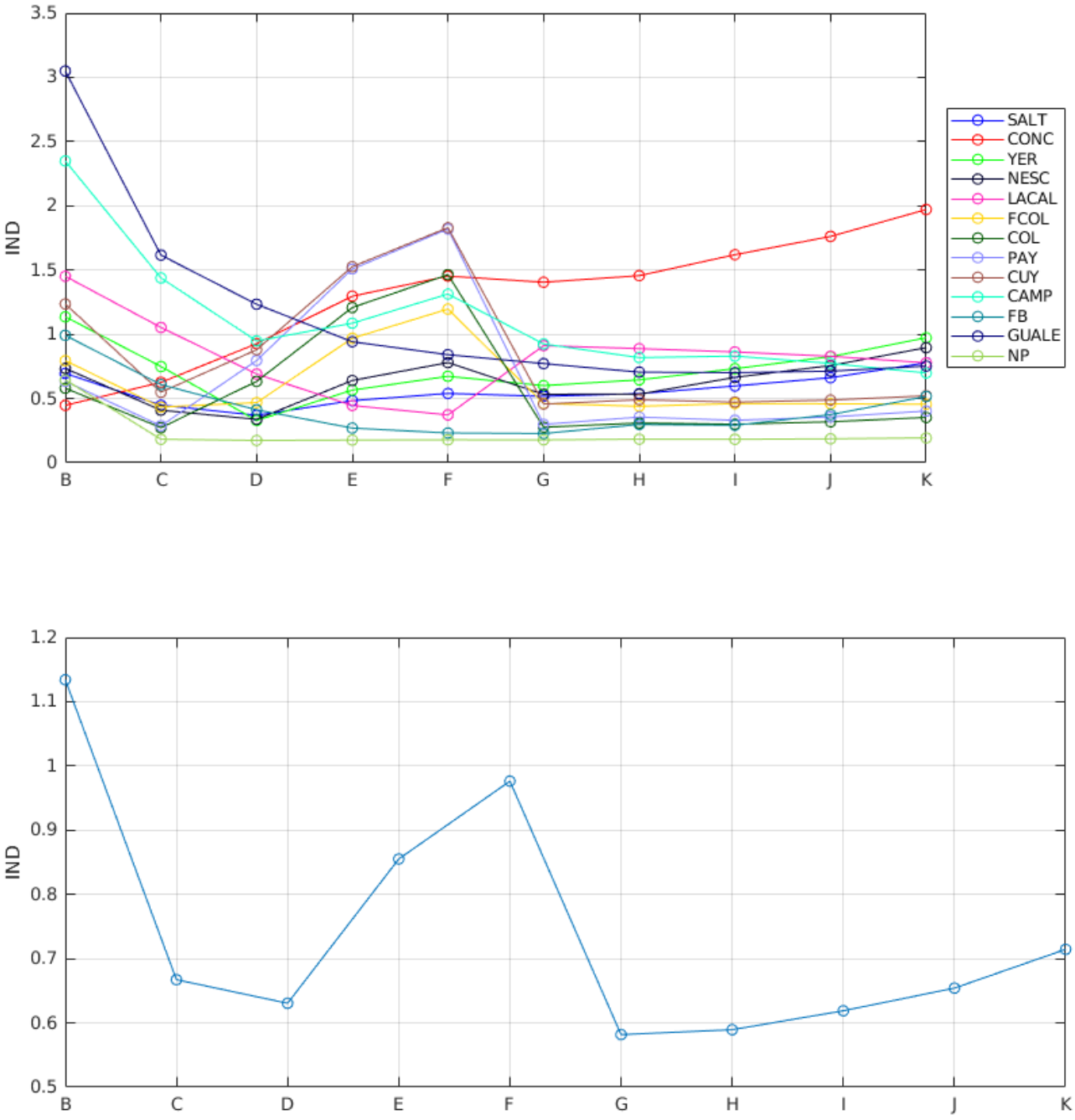


Figura 4.29: IND por estación y corrida (arriba) e IND global promedio por corrida (abajo).

4.2. Calibración de islas y planicie de inundación

En esta sección se presentan los resultados obtenidos para la calibración del coeficiente de rozamiento de las islas y planicie de inundación. Para cada serie de niveles modelada, se realizó la comparación con la serie medida correspondiente de la siguiente forma:

- Comparación gráfica de las series medidas y modeladas.

- Diagrama de Taylor para la comparación de estadísticos.

4.2.1. Salto

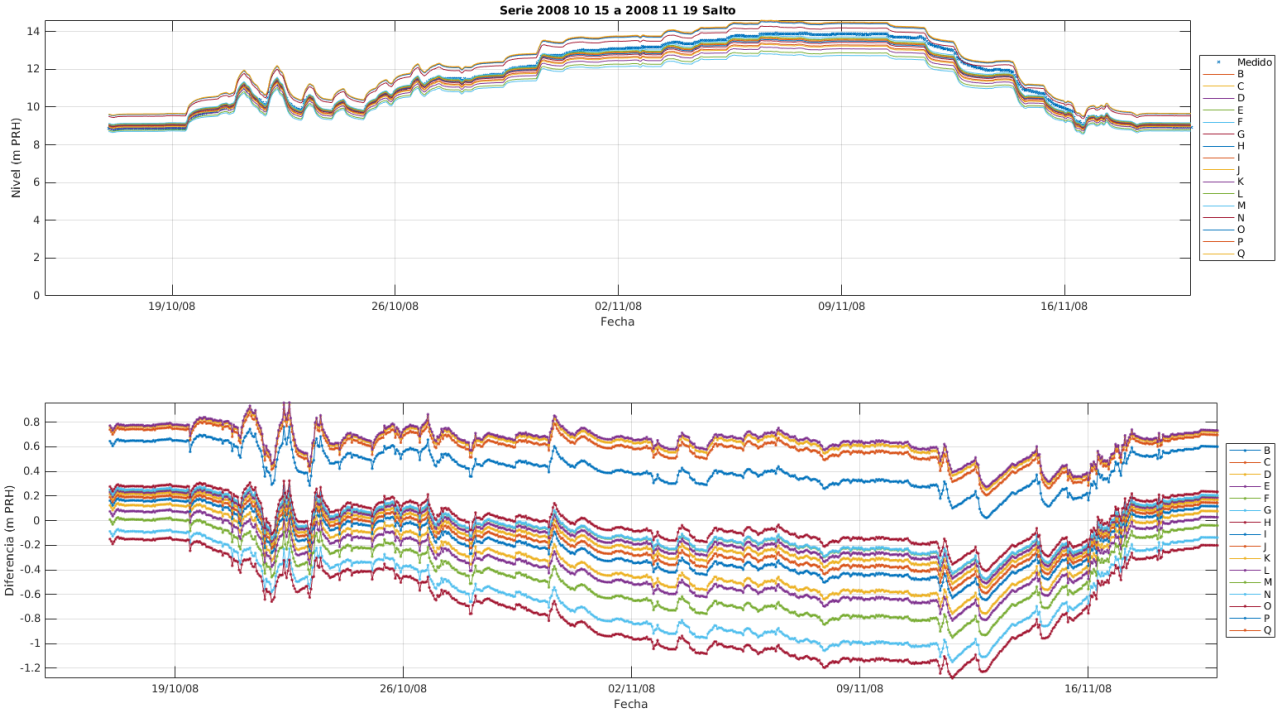


Figura 4.30: Arriba: comparación de series de niveles. Abajo: sesgo. - Salto.

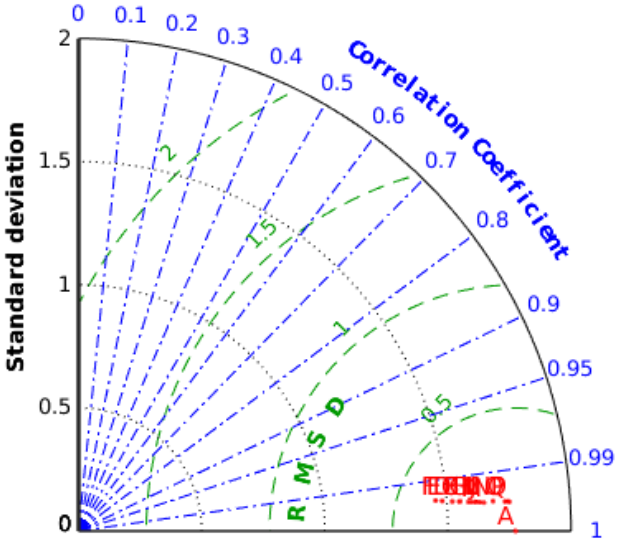


Figura 4.31: Diagrama de Taylor - Salto.

4.2.2. Concordia

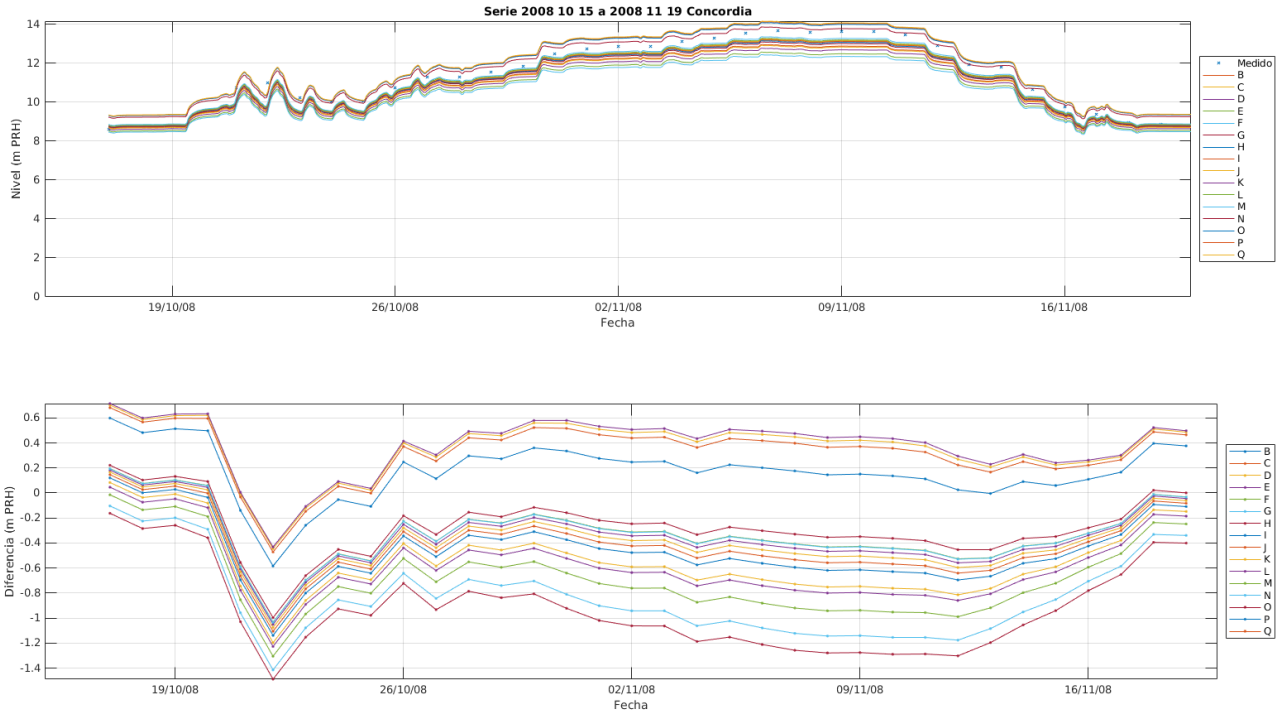


Figura 4.32: Arriba: comparación de series de niveles. Abajo: sesgo. - Concordia.

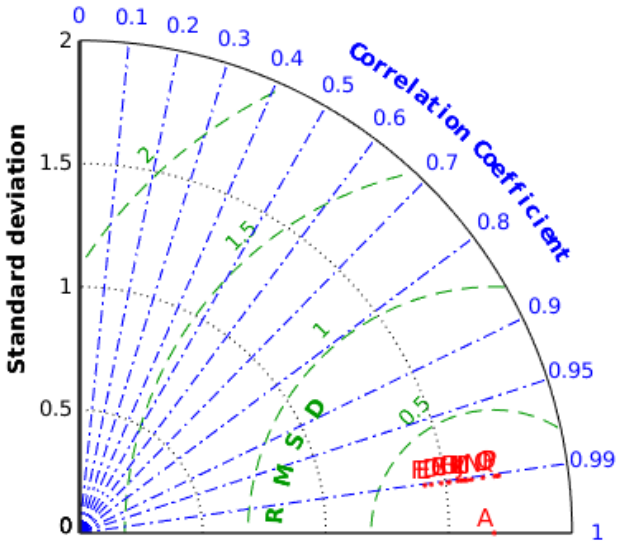


Figura 4.33: Diagrama de Taylor - Concordia.

4.2.3. Yeruá

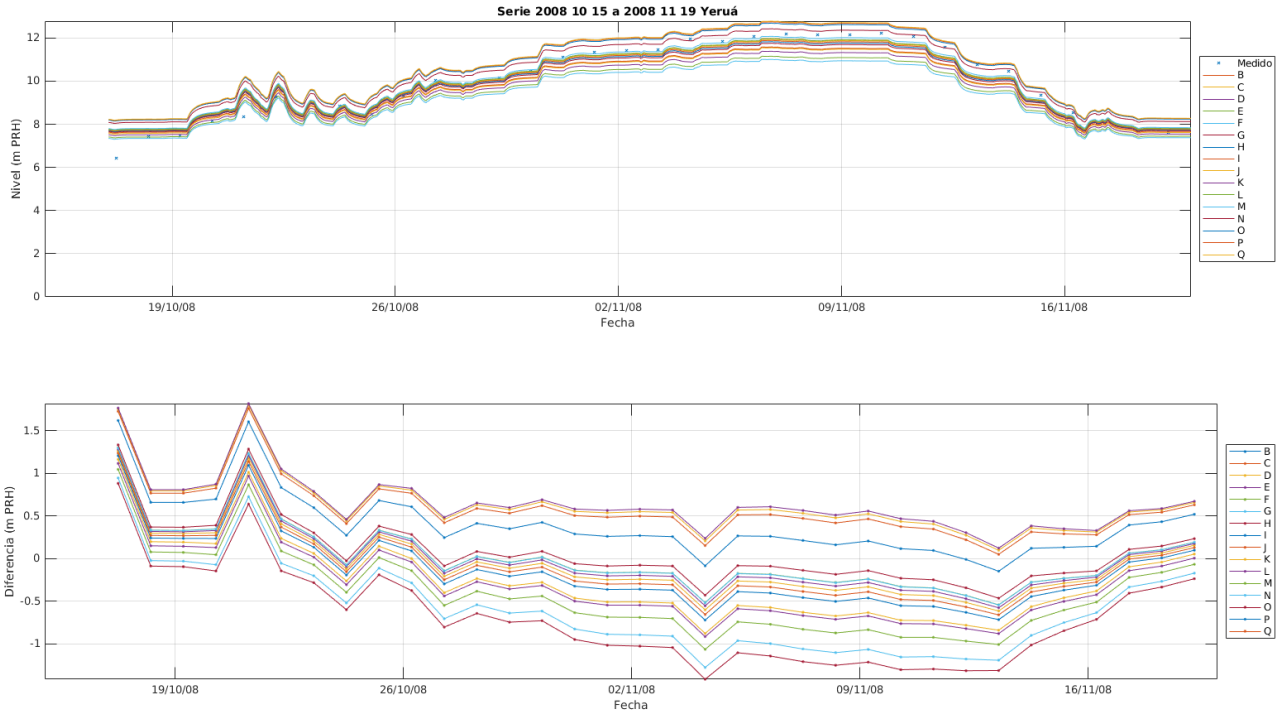


Figura 4.34: Arriba: comparación de series de niveles. Abajo: sesgo. - Yeruá.

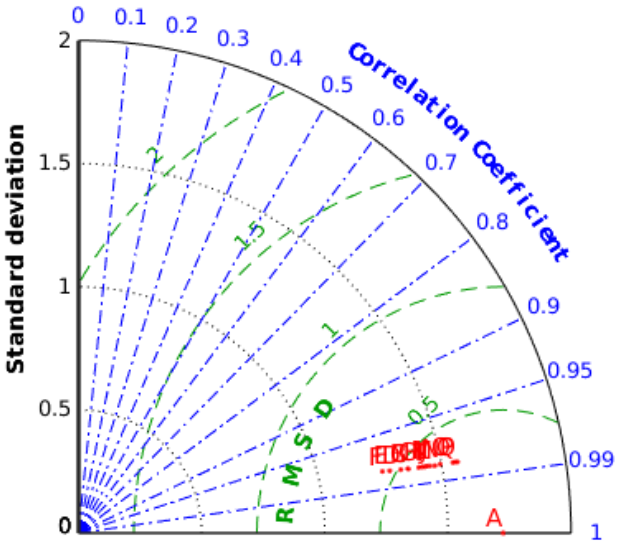


Figura 4.35: Diagrama de Taylor - Yeruá.

4.2.4. Nueva Escocia

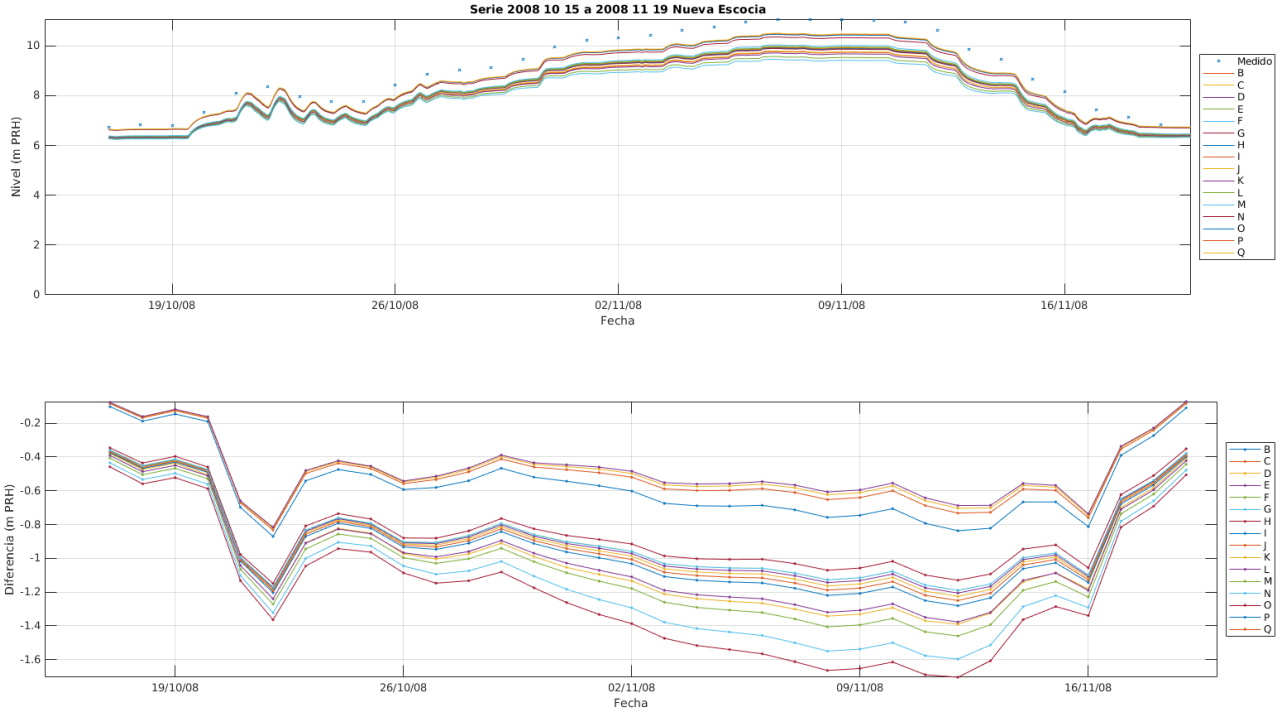


Figura 4.36: Arriba: comparación de series de niveles. Abajo: sesgo. - Nueva Escocia.

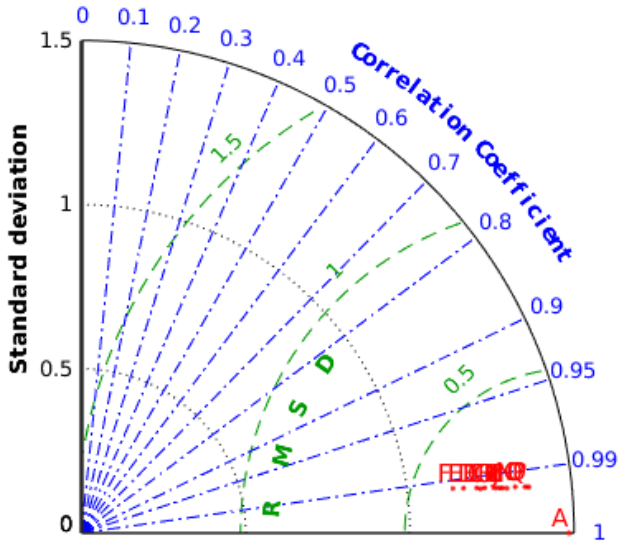


Figura 4.37: Diagrama de Taylor - Nueva Escocia.

4.2.5. La Calera

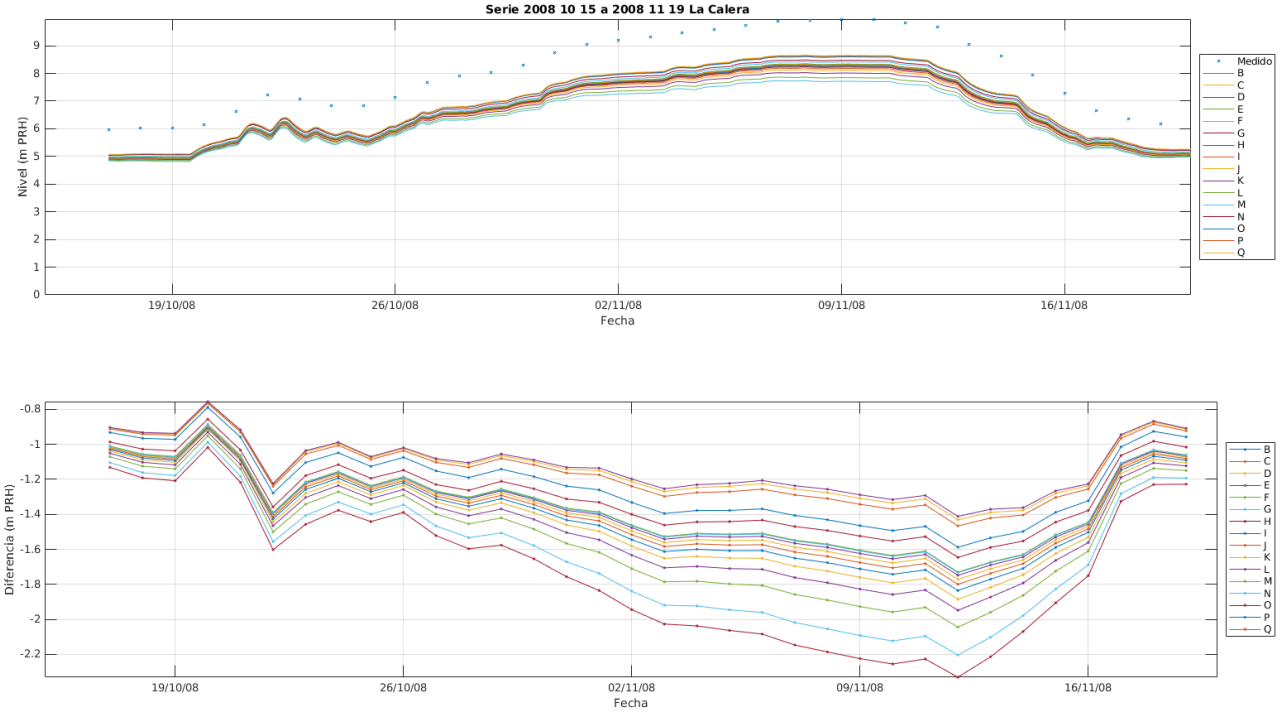


Figura 4.38: Arriba: comparación de series de niveles. Abajo: sesgo. - La Calera.

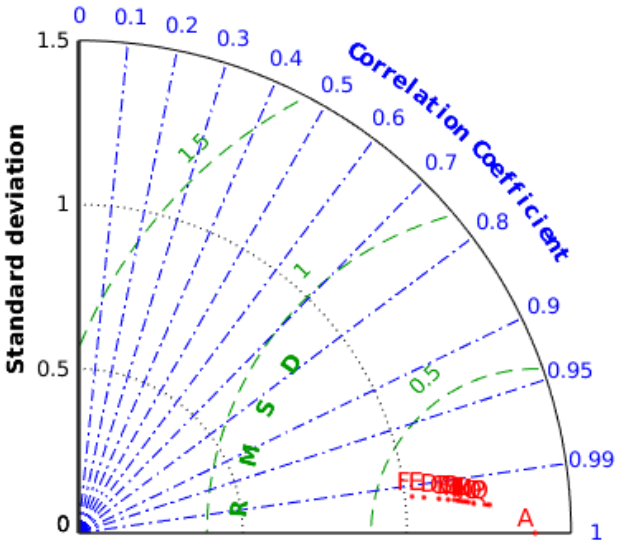


Figura 4.39: Diagrama de Taylor - La Calera.

4.2.6. Fábrica Colón

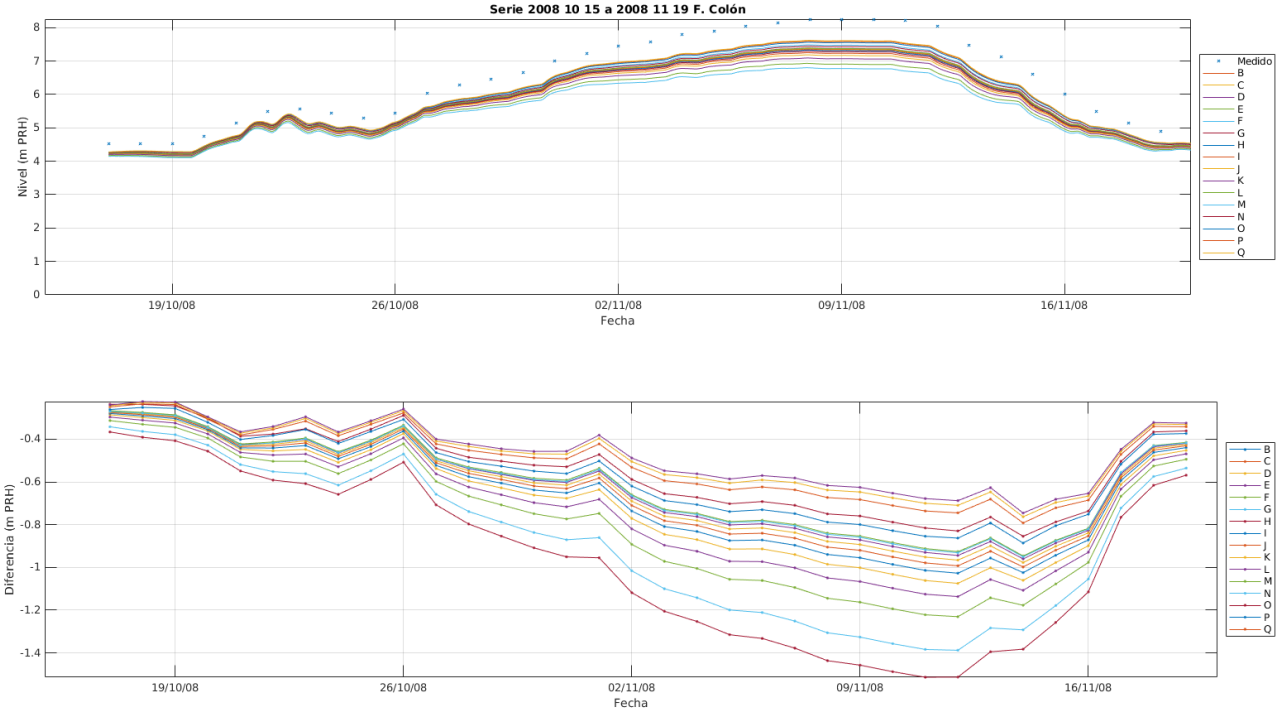


Figura 4.40: Arriba: comparación de series de niveles. Abajo: sesgo. - Fábrica Colón.

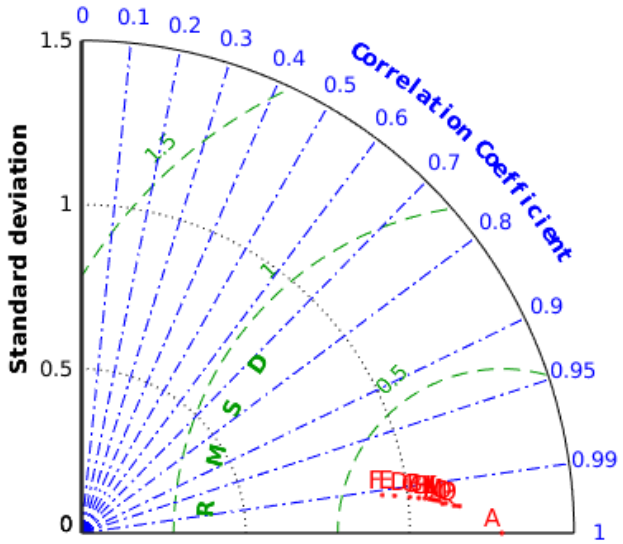


Figura 4.41: Diagrama de Taylor - Fábrica Colón.

4.2.7. Colón

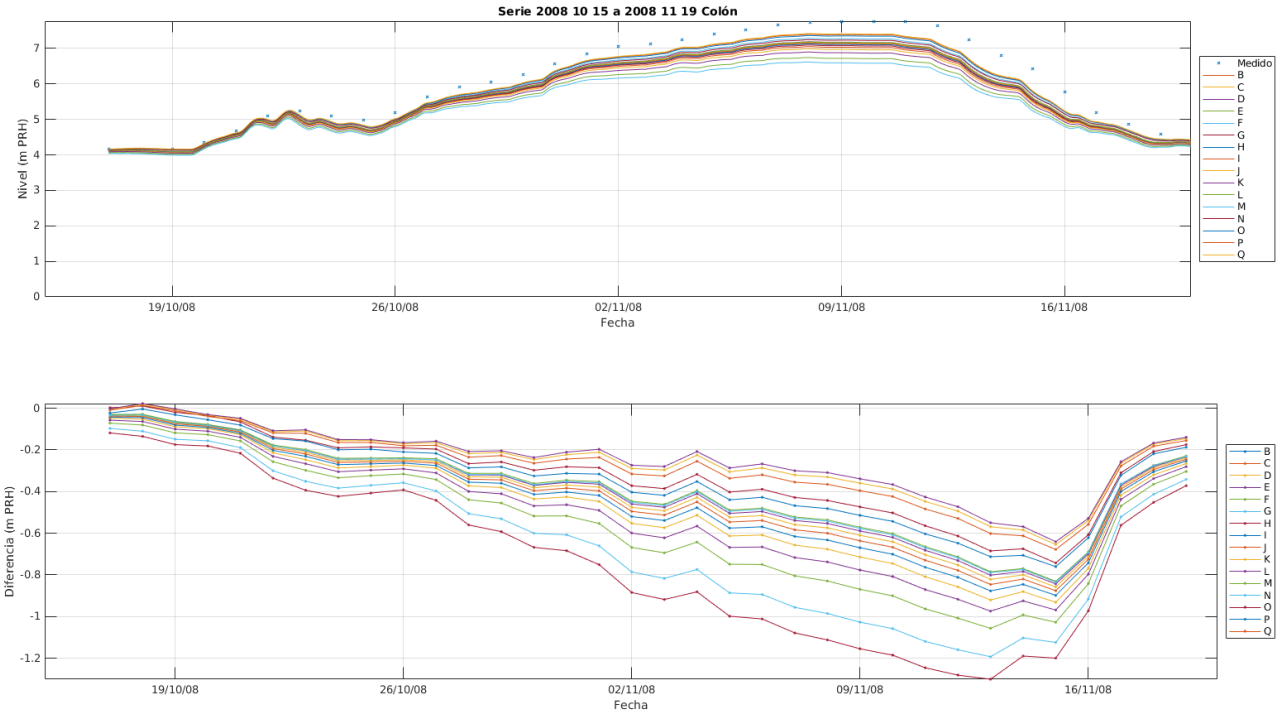


Figura 4.42: Arriba: comparación de series de niveles. Abajo: sesgo. - Colón.

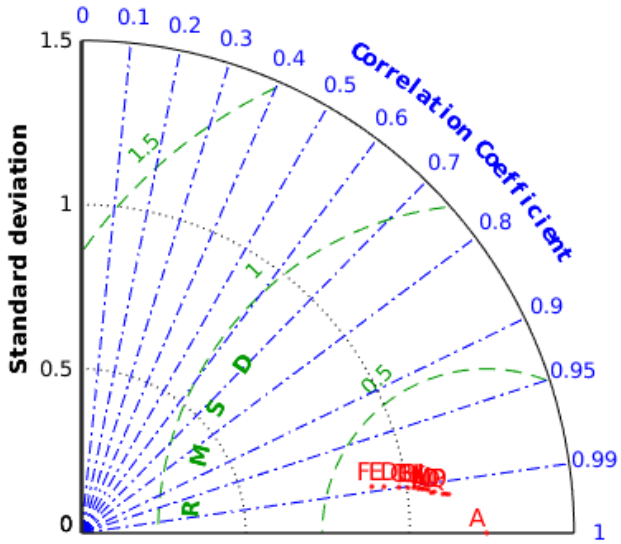


Figura 4.43: Diagrama de Taylor - Colón.

4.2.8. Paysandú

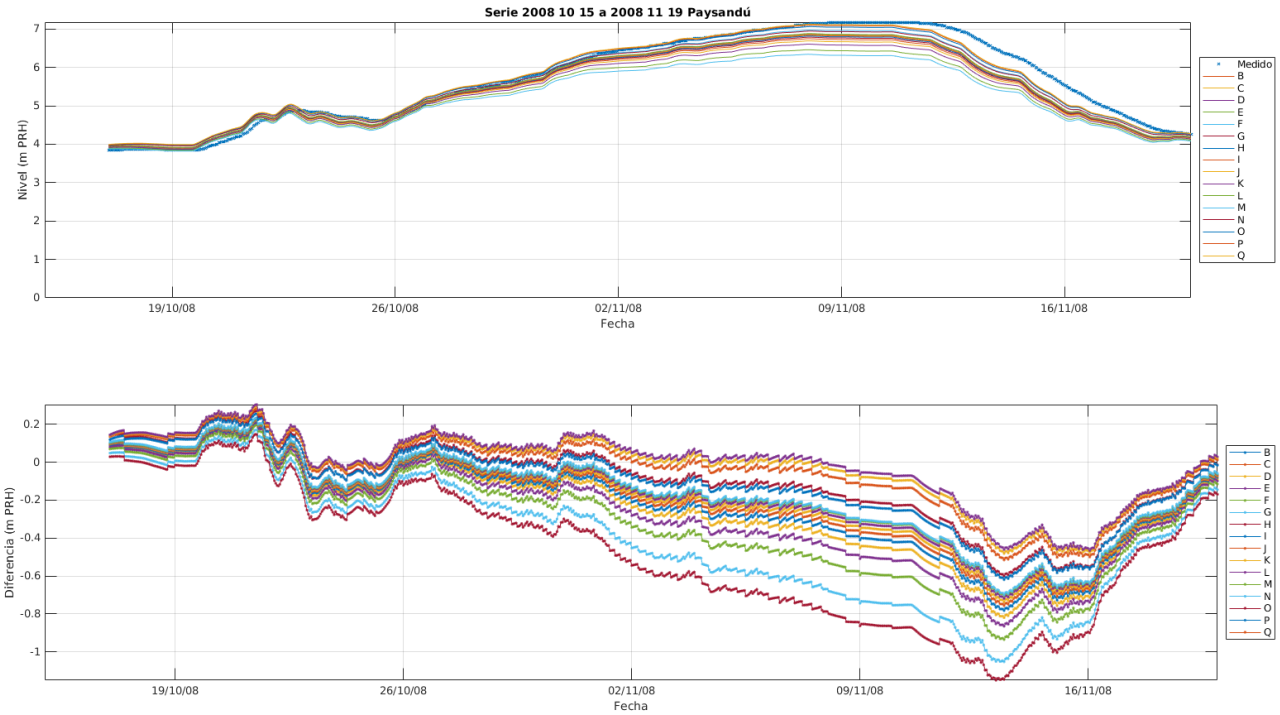


Figura 4.44: Arriba: comparación de series de niveles. Abajo: sesgo. - Paysandú.

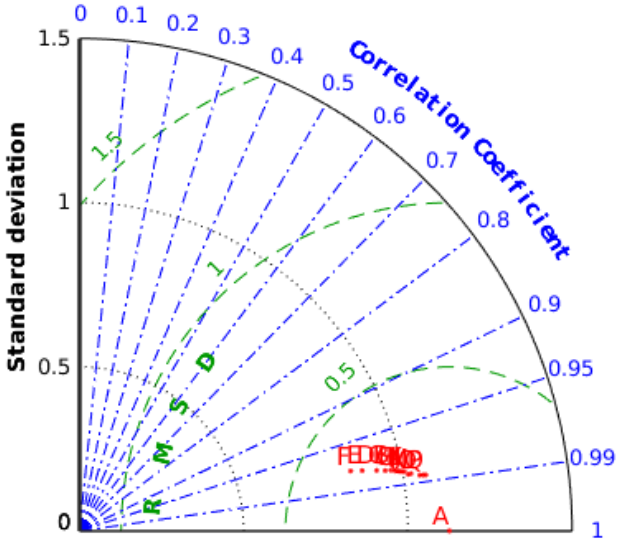


Figura 4.45: Diagrama de Taylor - Paysandú.

4.2.9. Concepción del Uruguay

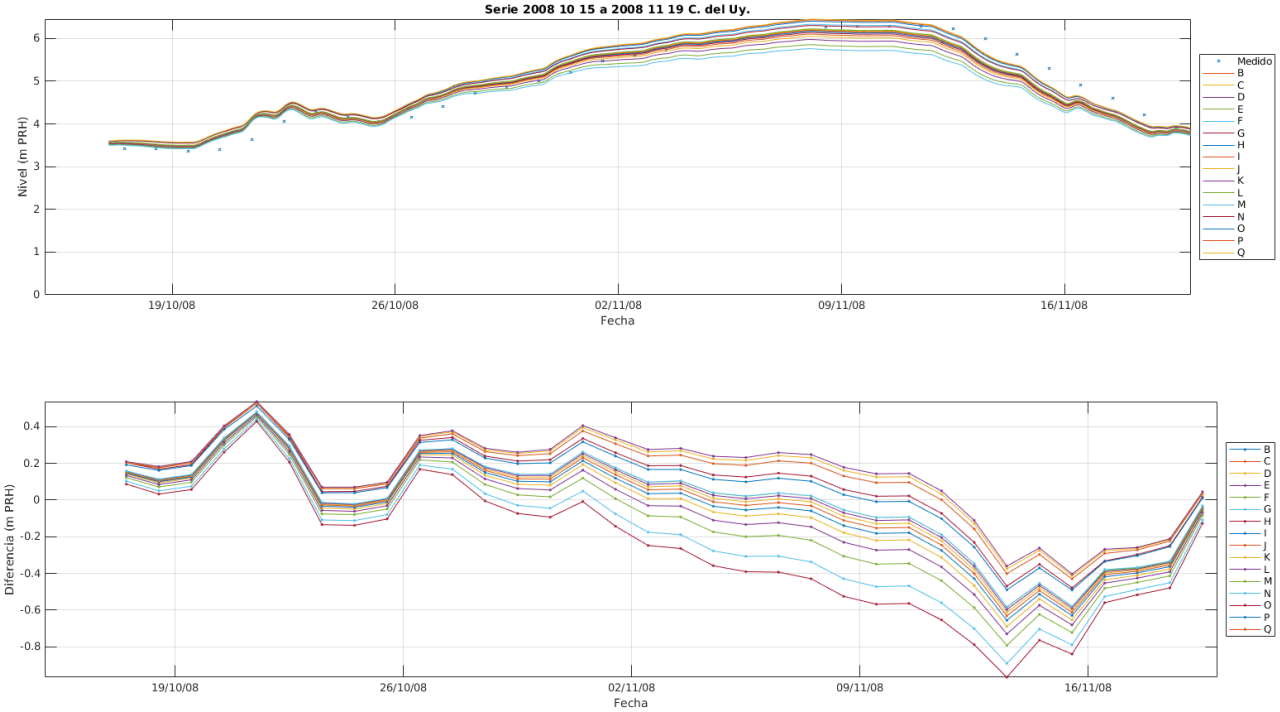


Figura 4.46: Arriba: comparación de series de niveles. Abajo: sesgo. - Concepción del Uruguay.

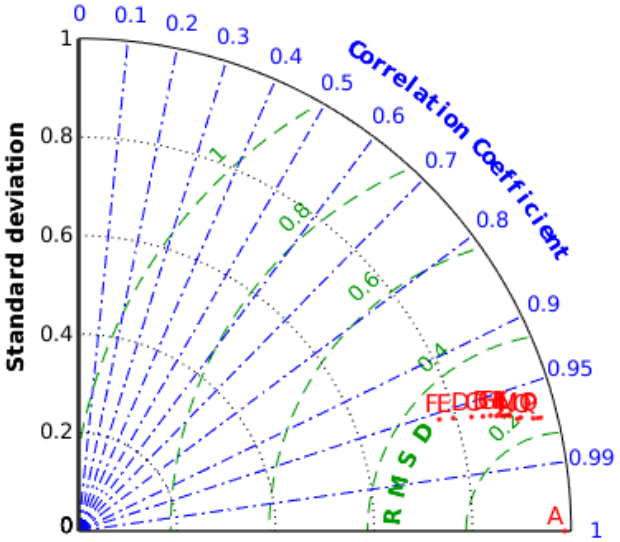


Figura 4.47: Diagrama de Taylor - Concepción del Uruguay.

4.2.10. Campichuelo

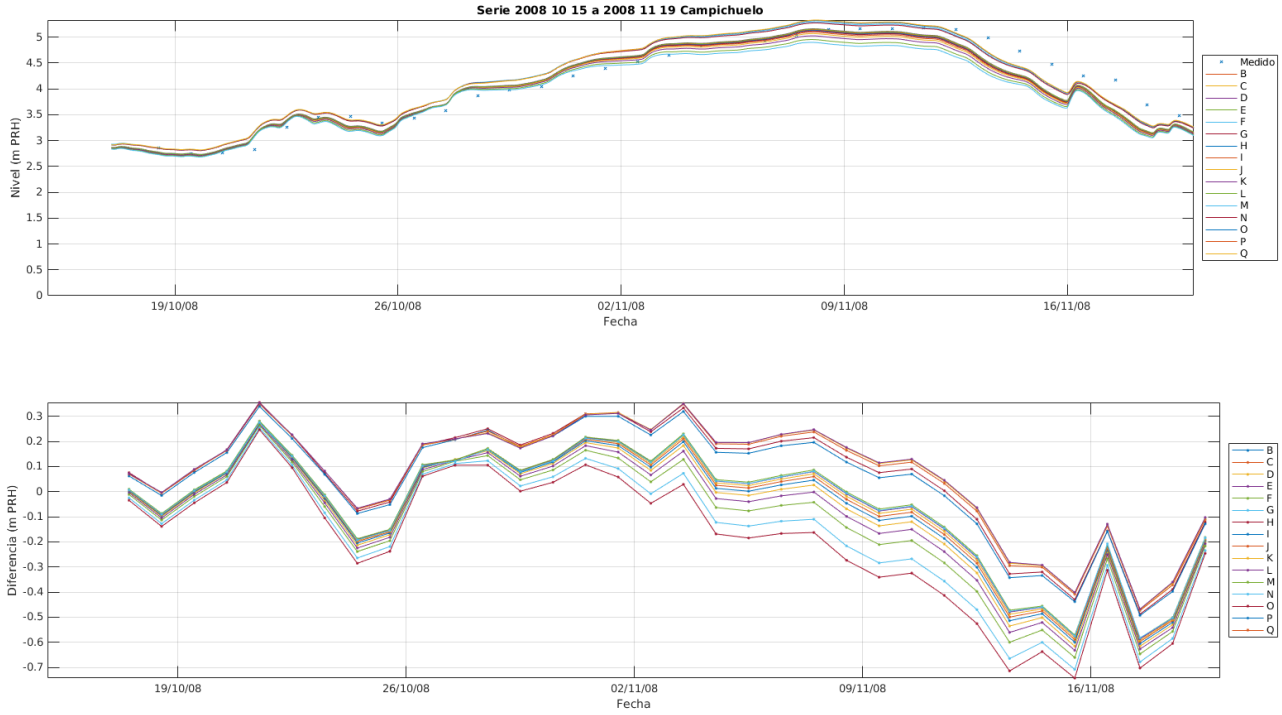


Figura 4.48: Arriba: comparación de series de niveles. Abajo: sesgo. - Campichuelo.

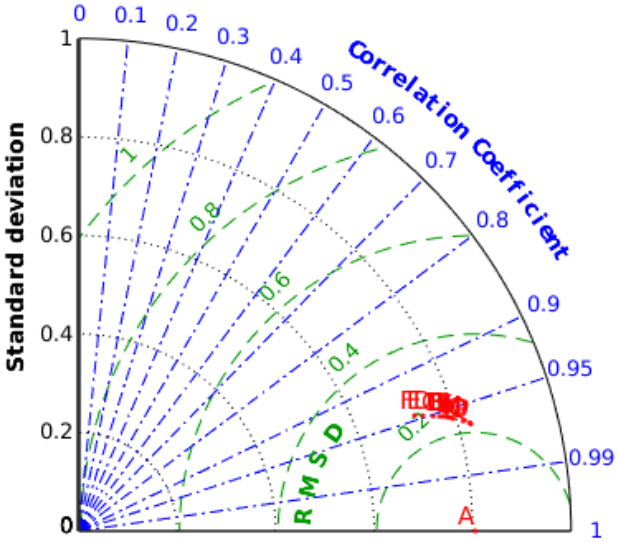


Figura 4.49: Diagrama de Taylor - Campichuelo.

4.2.11. Fray Bentos

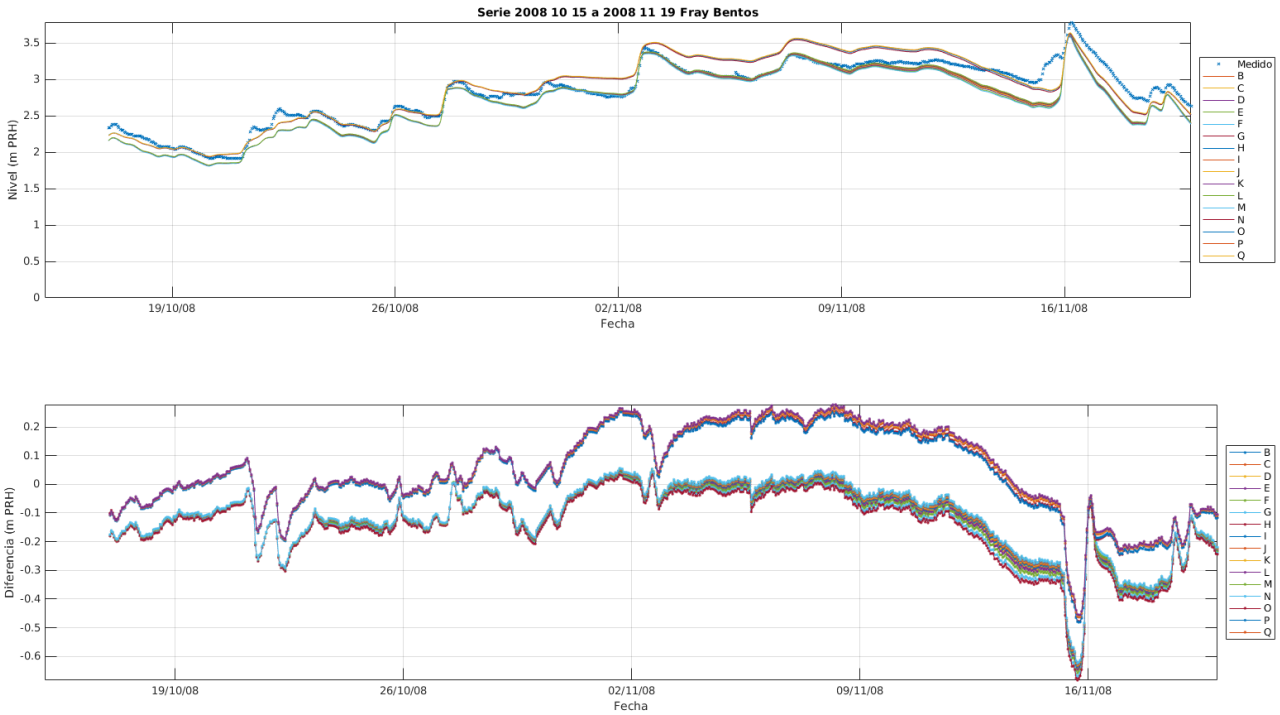


Figura 4.50: Arriba: comparación de series de niveles. Abajo: sesgo. - Fray Bentos.

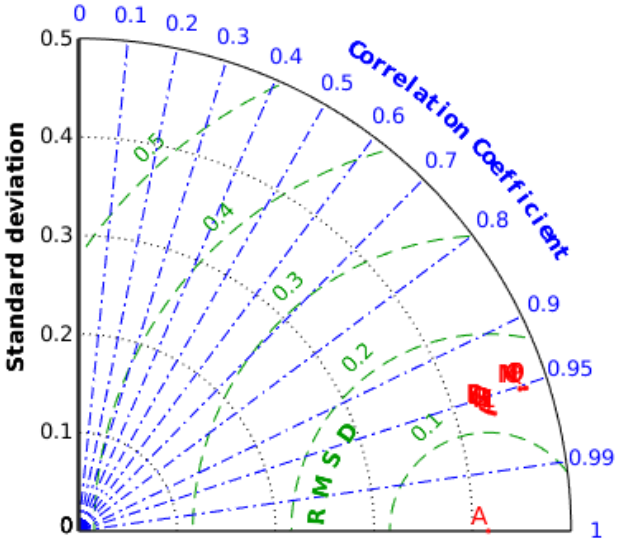


Figura 4.51: Diagrama de Taylor - Fray Bentos.

4.2.12. Gualeguaychú

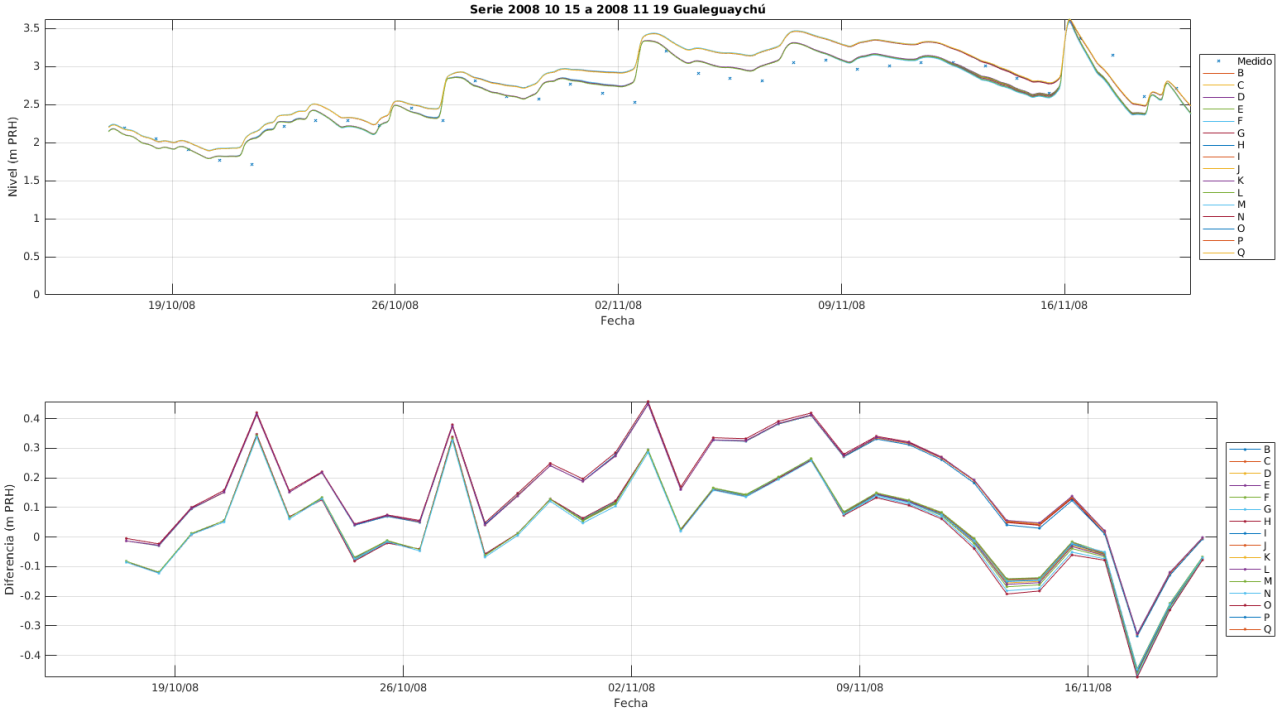


Figura 4.52: Arriba: comparación de series de niveles. Abajo: sesgo. - Gualeguaychú.

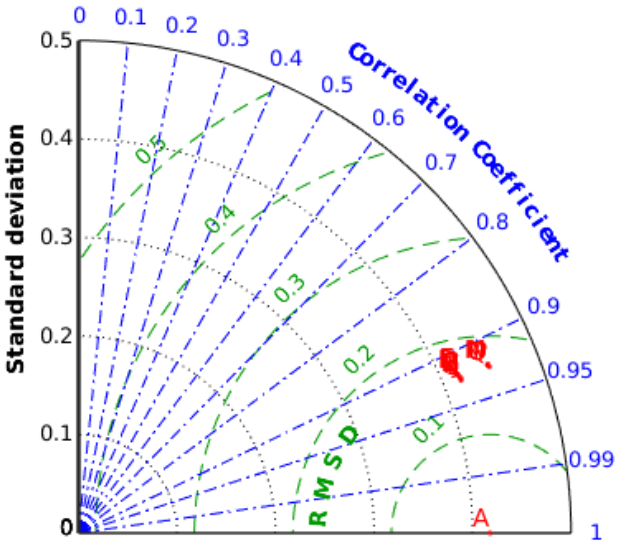


Figura 4.53: Diagrama de Taylor - Gualeguaychú.

4.2.13. Nueva Palmira

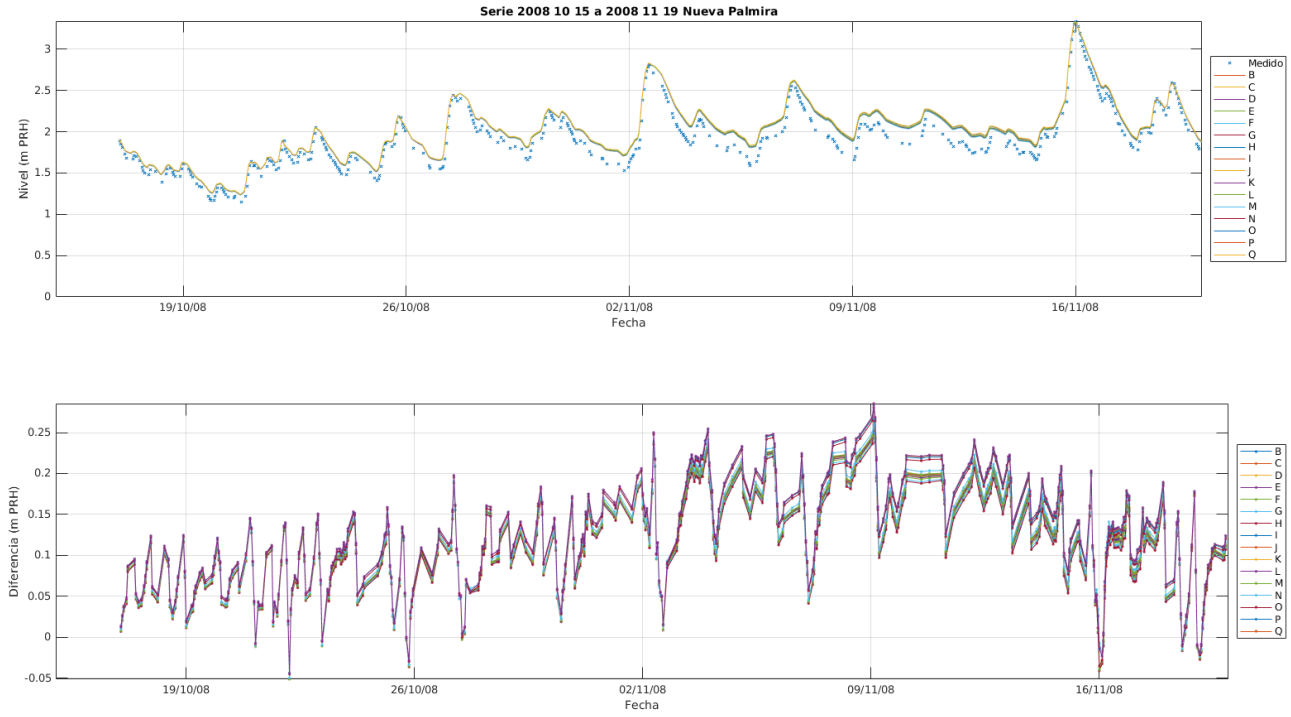


Figura 4.54: Arriba: comparación de series de niveles. Abajo: sesgo. - Nueva Palmira.

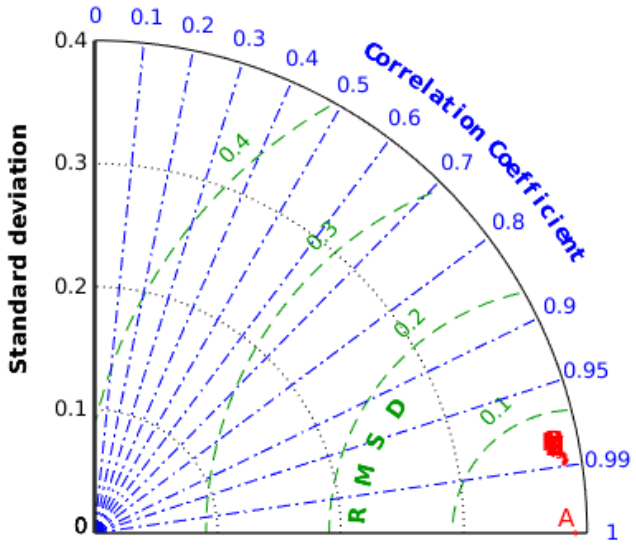


Figura 4.55: Diagrama de Taylor - Nueva Palmira.

4.2.14. Indicadores

En esta sección se presentan los parámetros indicadores utilizados, tanto por estación como globales, para determinar el ajuste del modelo a las series medidas. A saber: error RMS, coeficiente de correlación, sesgo e $IND = (ERMS + abs(SESGO))/(CORCOEF \times STD)$.

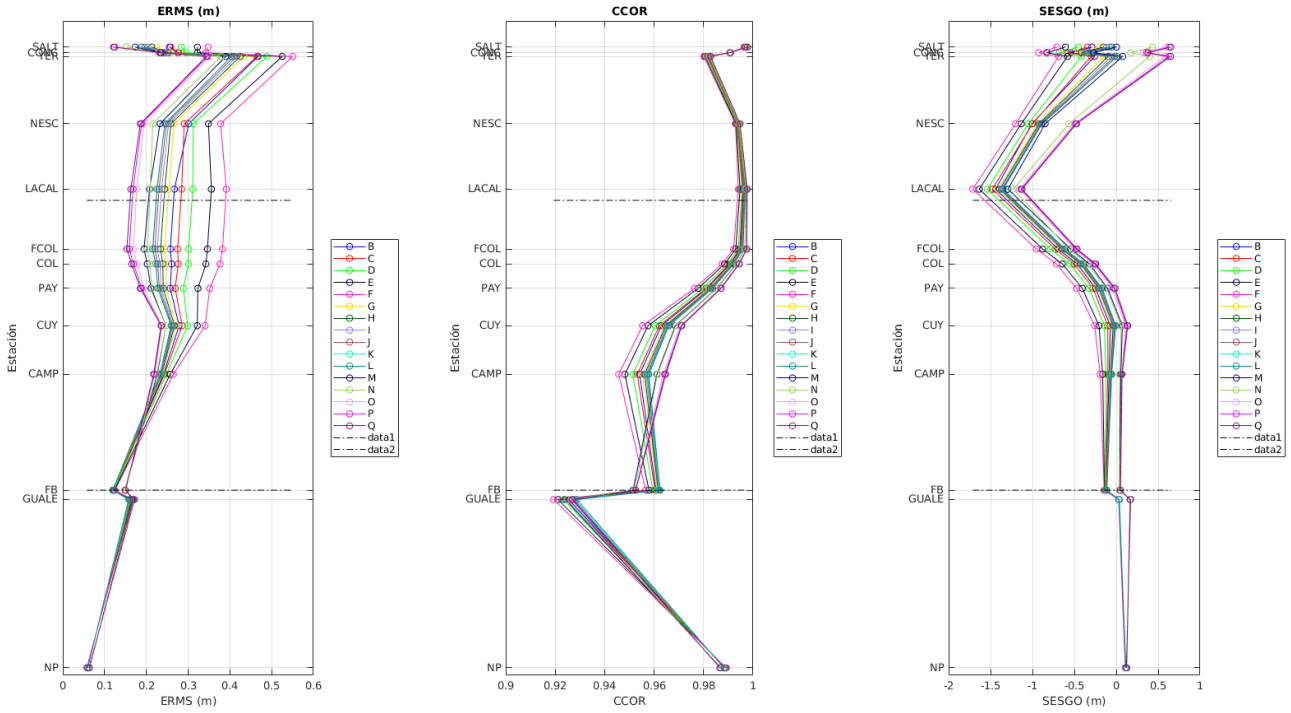


Figura 4.56: Error RMS, coeficiente de correlación y sesgo para cada estación por corrida.

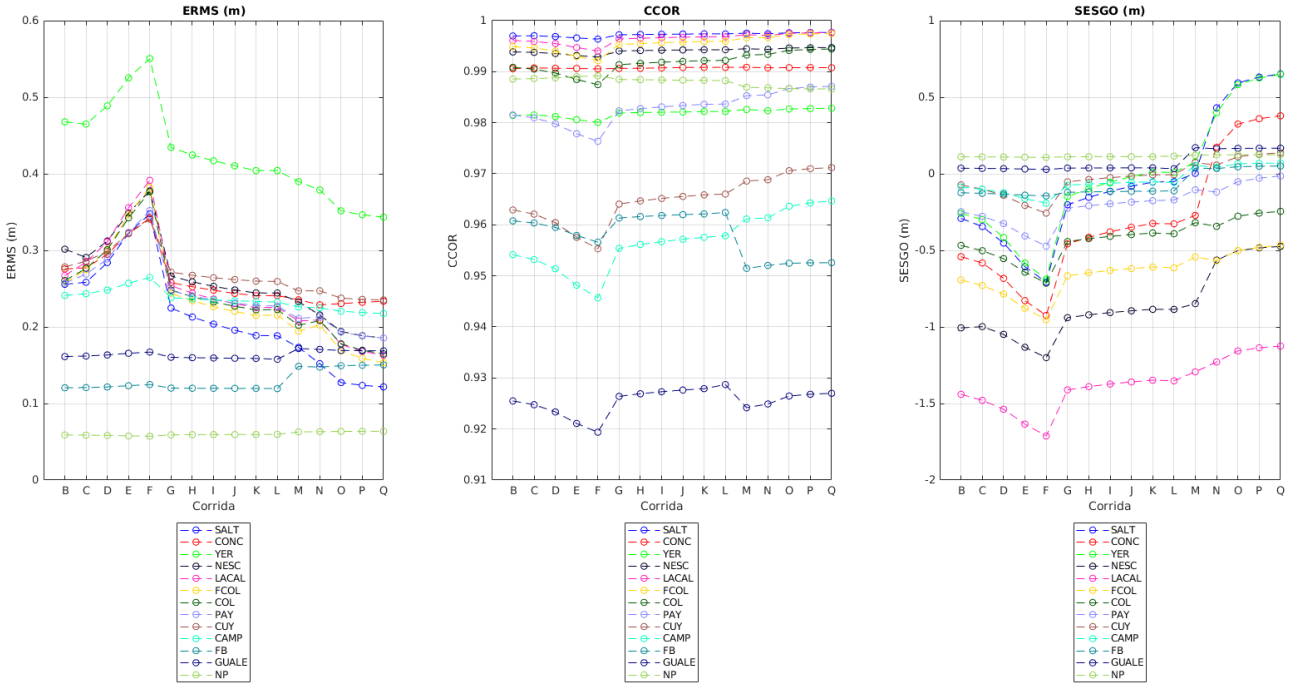


Figura 4.57: Error RMS, coeficiente de correlación y sesgo para cada corrida por estación.

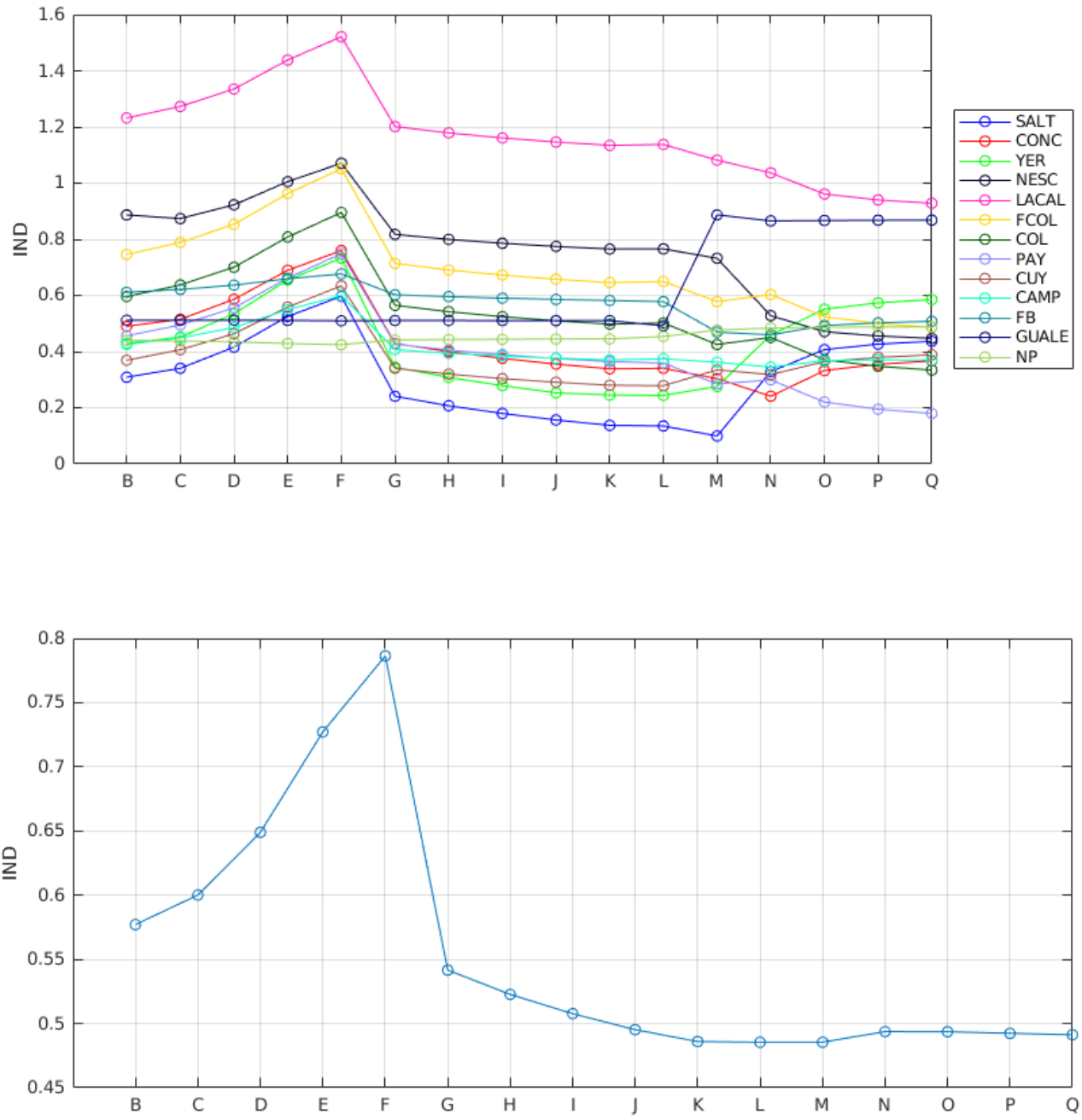


Figura 4.58: IND por estación y corrida (arriba) e IND global promedio por corrida (abajo).

4.3. Calibración de coeficiente de influencia del viento

En esta sección se presentan los resultados obtenidos para la calibración del coeficiente de influencia del viento. Para cada serie de niveles modelada, se realizó la comparación con la serie medida correspondiente de la siguiente forma:

- Comparación gráfica de las series medidas y modeladas.

- Diagrama de Taylor para la comparación de estadísticos.

4.3.1. Salto

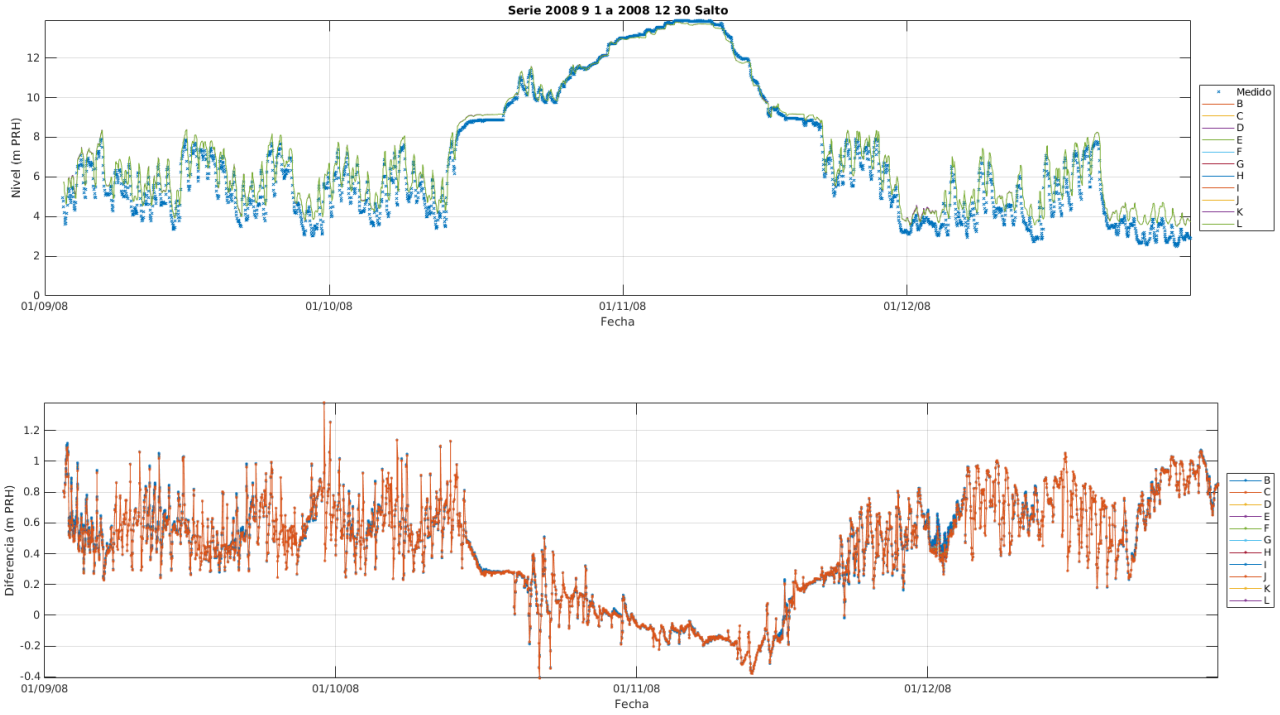


Figura 4.59: Arriba: comparación de series de niveles. Abajo: sesgo. - Salto.

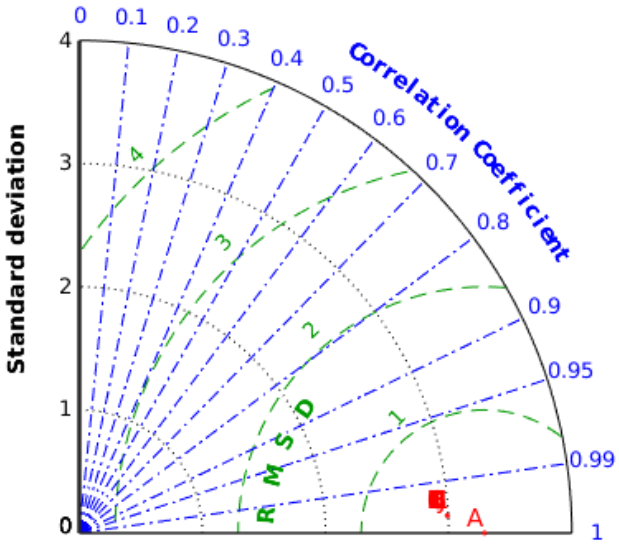


Figura 4.60: Diagrama de Taylor - Salto.

4.3.2. Concordia

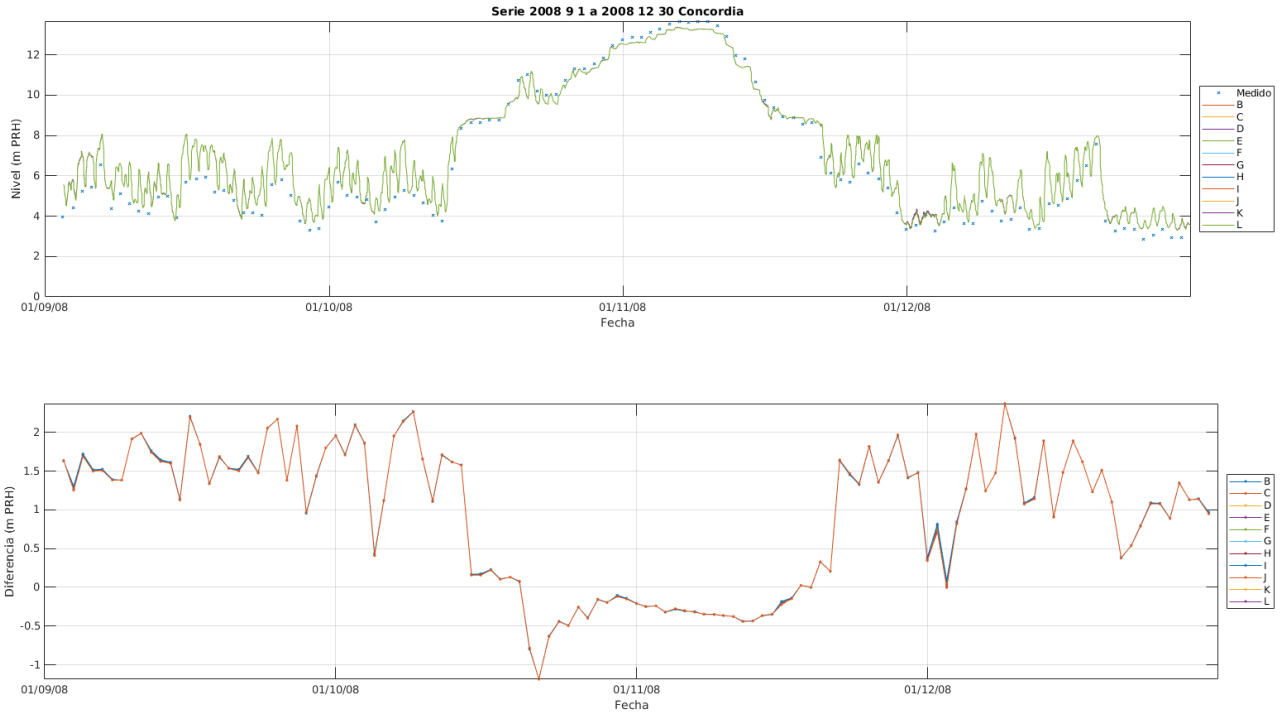


Figura 4.61: Arriba: comparación de series de niveles. Abajo: sesgo. - Concordia.

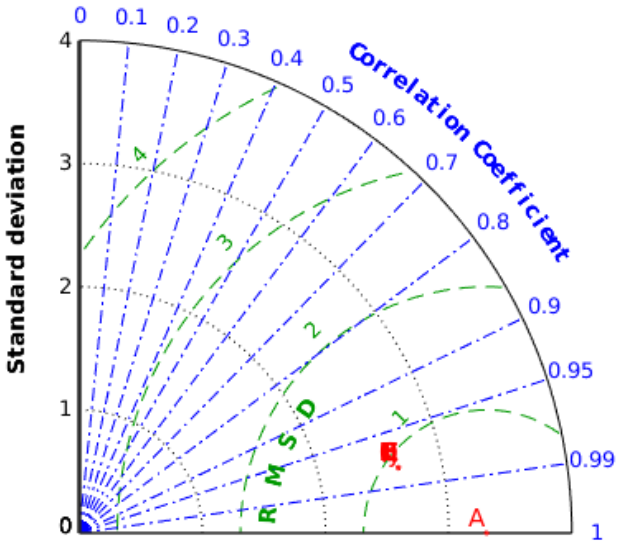


Figura 4.62: Diagrama de Taylor - Concordia.

4.3.3. Yeruá

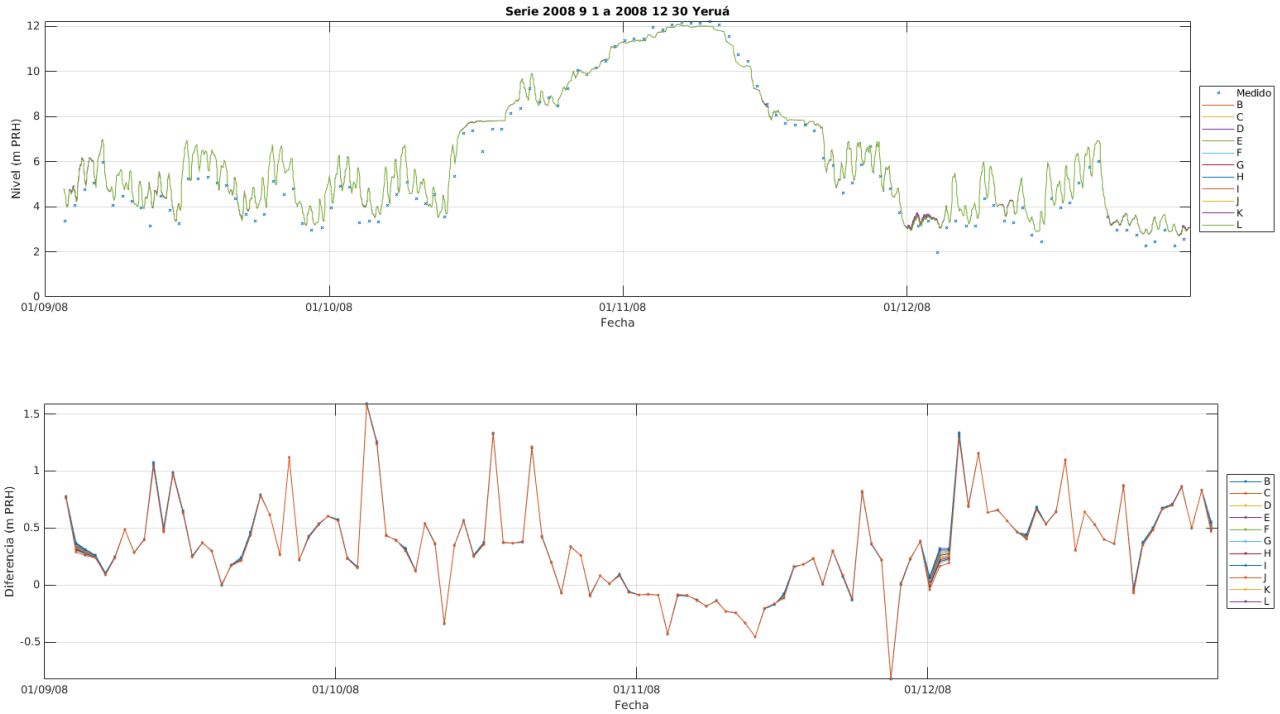


Figura 4.63: Arriba: comparación de series de niveles. Abajo: sesgo. - Yeruá.

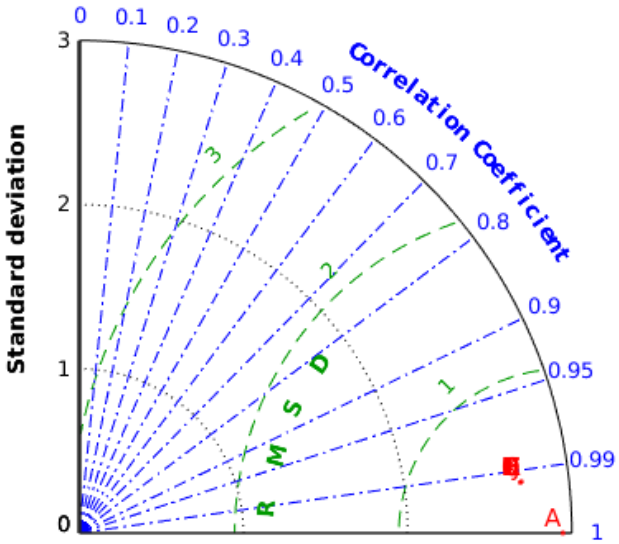


Figura 4.64: Diagrama de Taylor - Yeruá.

4.3.4. Nueva Escocia

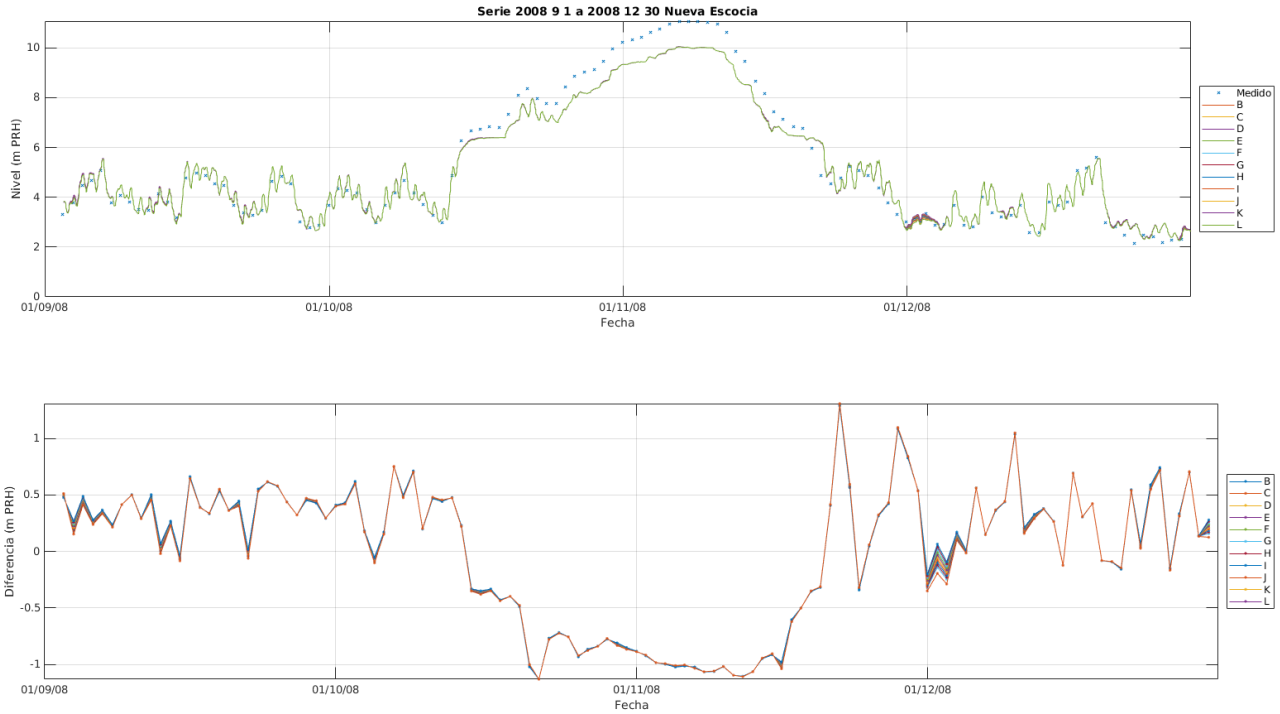


Figura 4.65: Arriba: comparación de series de niveles. Abajo: sesgo. - Nueva Escocia.

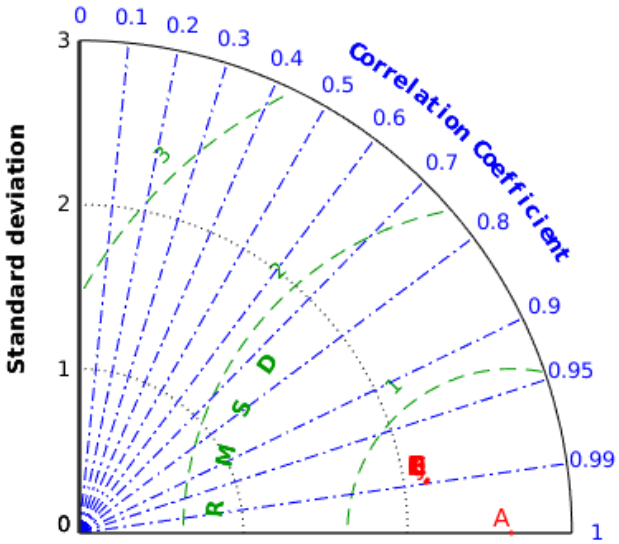


Figura 4.66: Diagrama de Taylor - Nueva Escocia.

4.3.5. La Calera

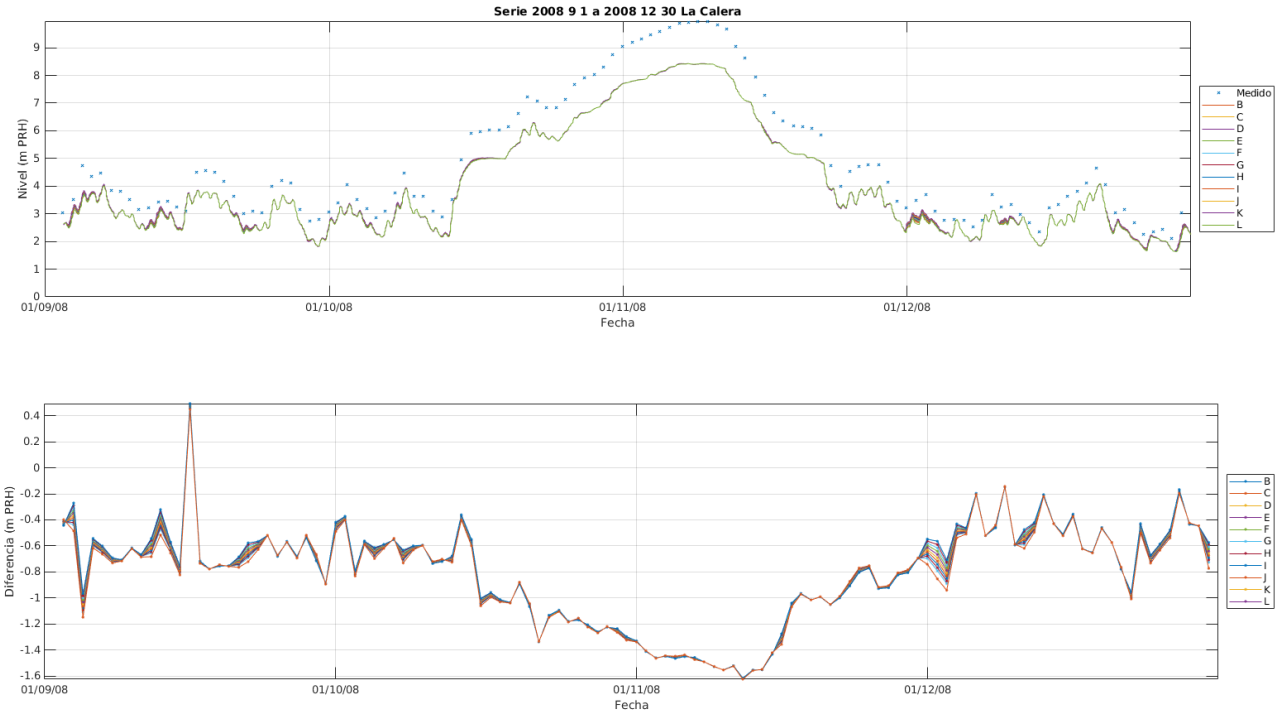


Figura 4.67: Arriba: comparación de series de niveles. Abajo: sesgo. - La Calera.

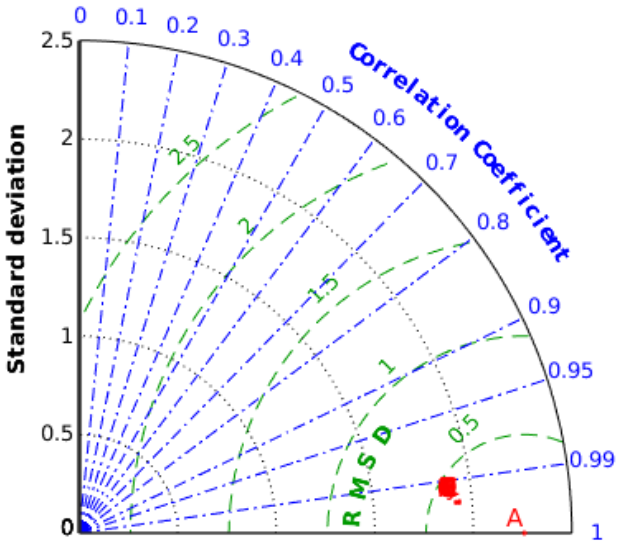


Figura 4.68: Diagrama de Taylor - La Calera.

4.3.6. Fábrica Colón

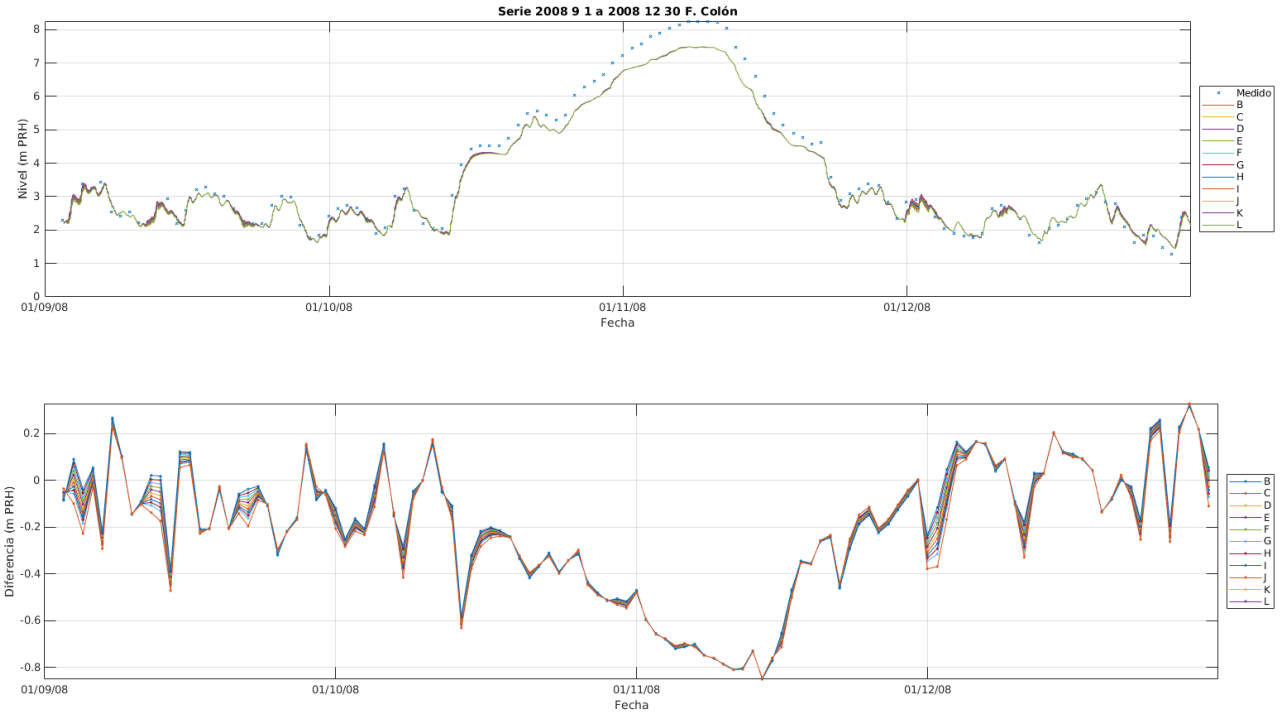


Figura 4.69: Arriba: comparación de series de niveles. Abajo: sesgo. - Fábrica Colón.

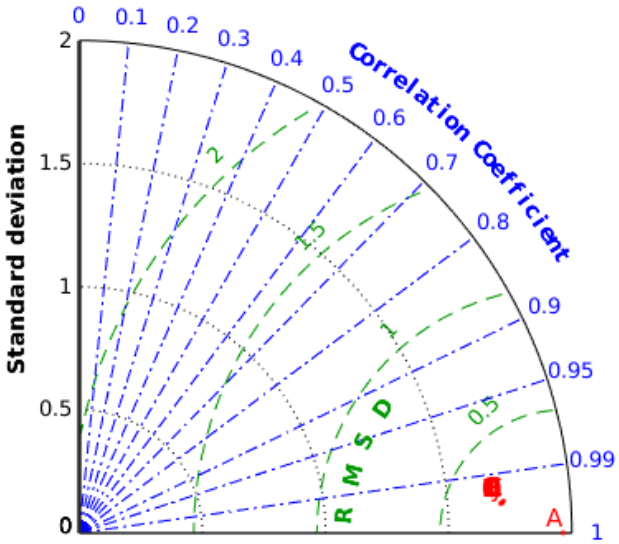


Figura 4.70: Diagrama de Taylor - Fábrica Colón.

4.3.7. Colón

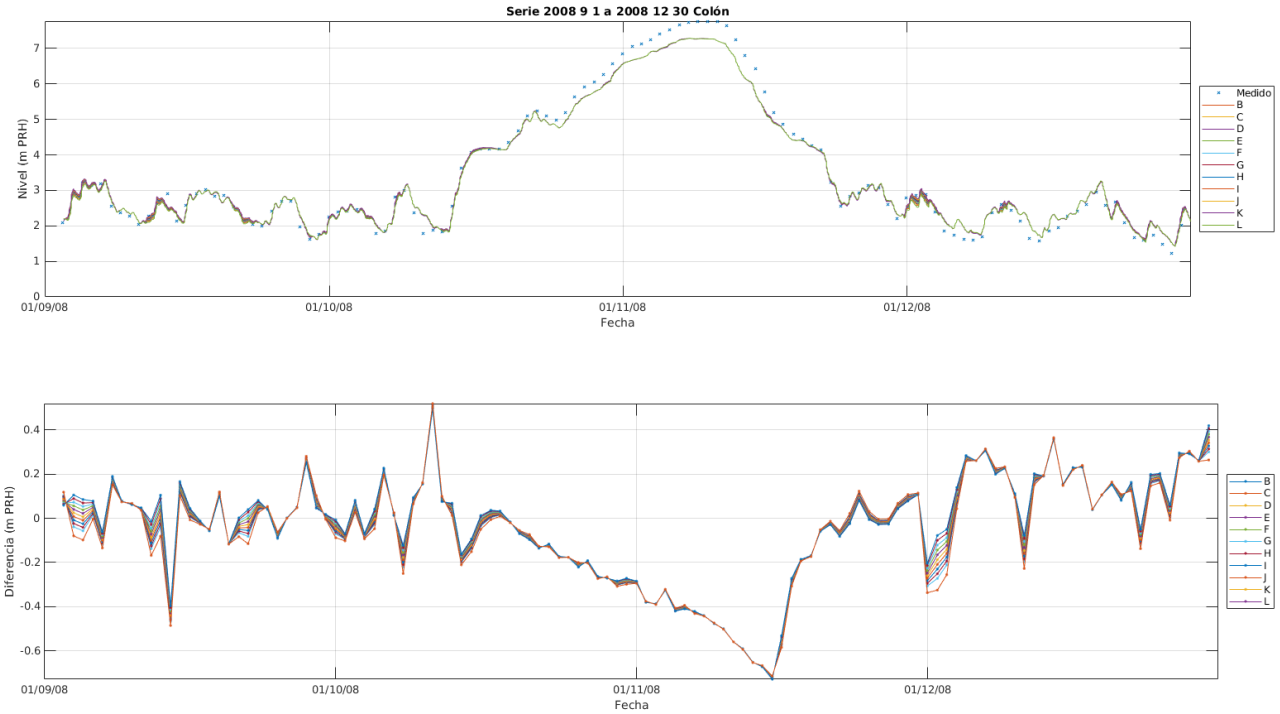


Figura 4.71: Arriba: comparación de series de niveles. Abajo: sesgo. - Colón.

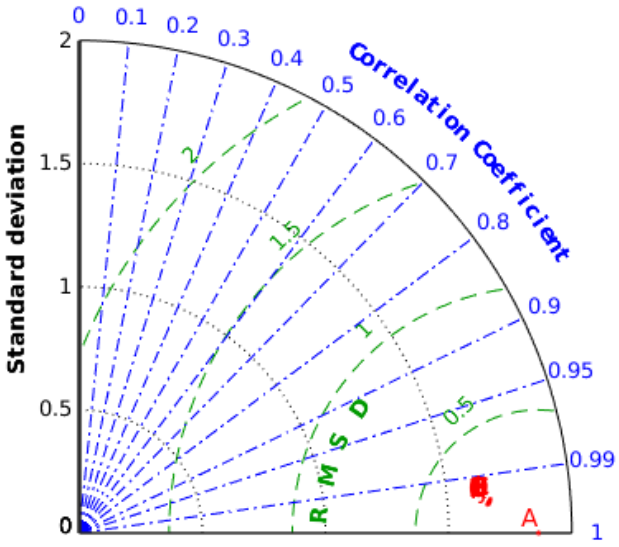


Figura 4.72: Diagrama de Taylor - Colón.

4.3.8. Paysandú

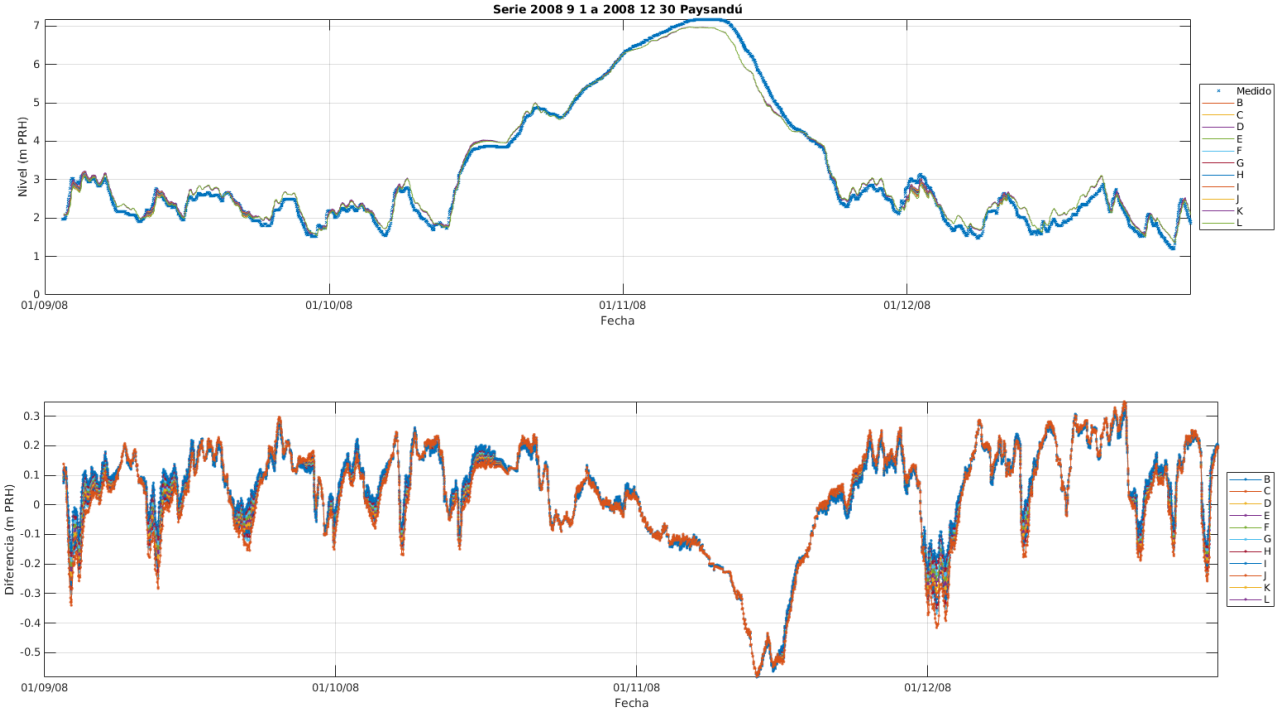


Figura 4.73: Arriba: comparación de series de niveles. Abajo: sesgo. - Paysandú.

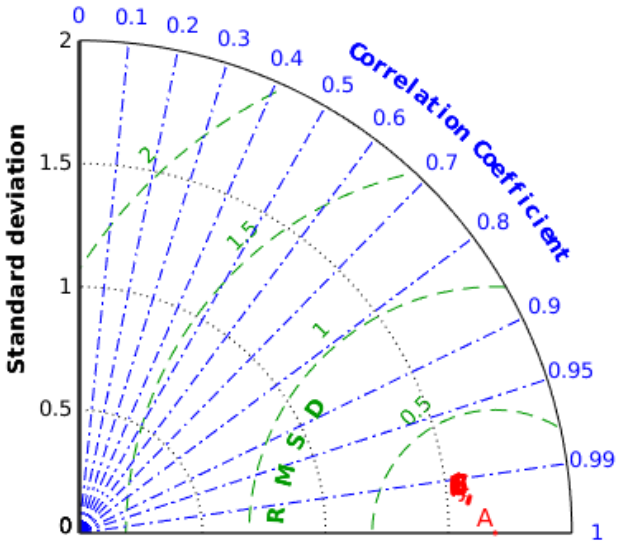


Figura 4.74: Diagrama de Taylor - Paysandú.

4.3.9. Concepción del Uruguay

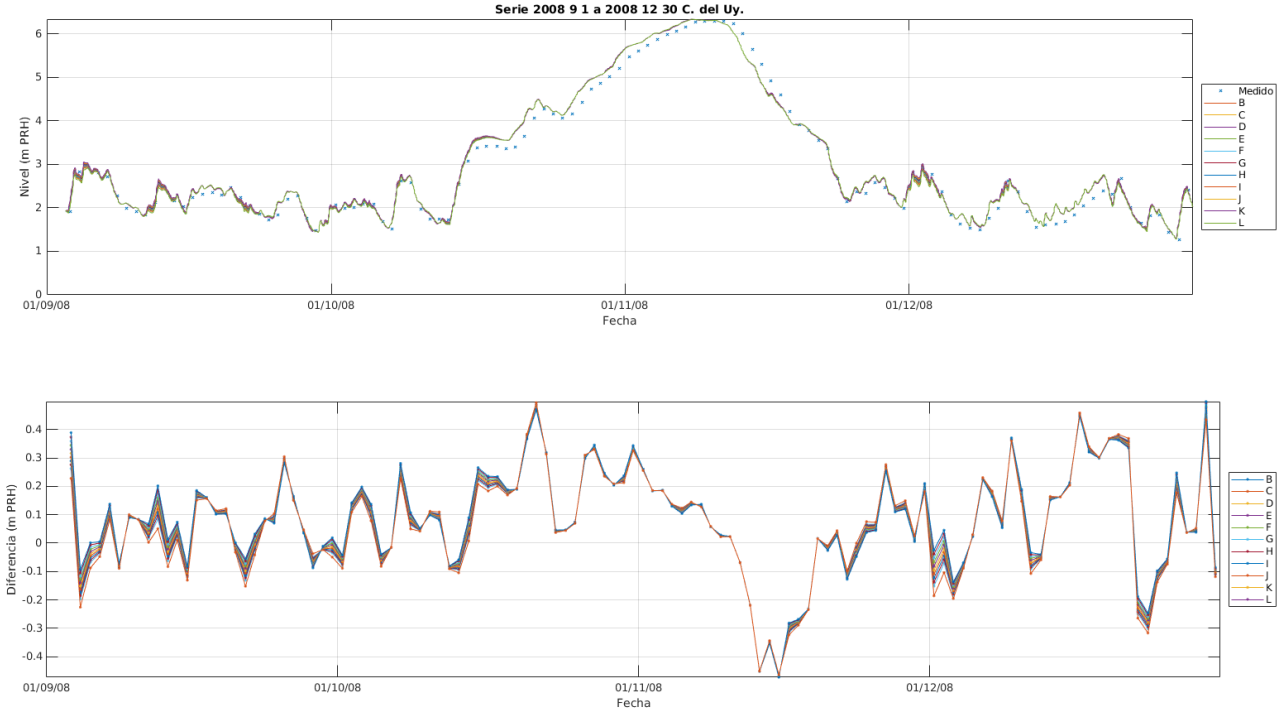


Figura 4.75: Arriba: comparación de series de niveles. Abajo: sesgo. - Concepción del Uruguay.

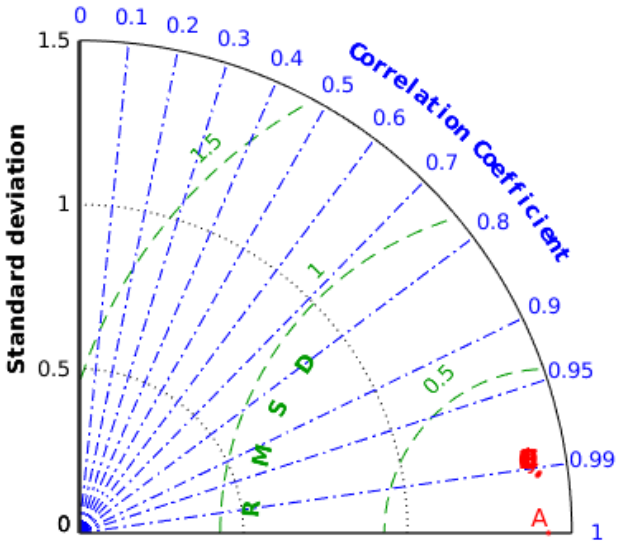


Figura 4.76: Diagrama de Taylor - Concepción del Uruguay.

4.3.10. Campichuelo

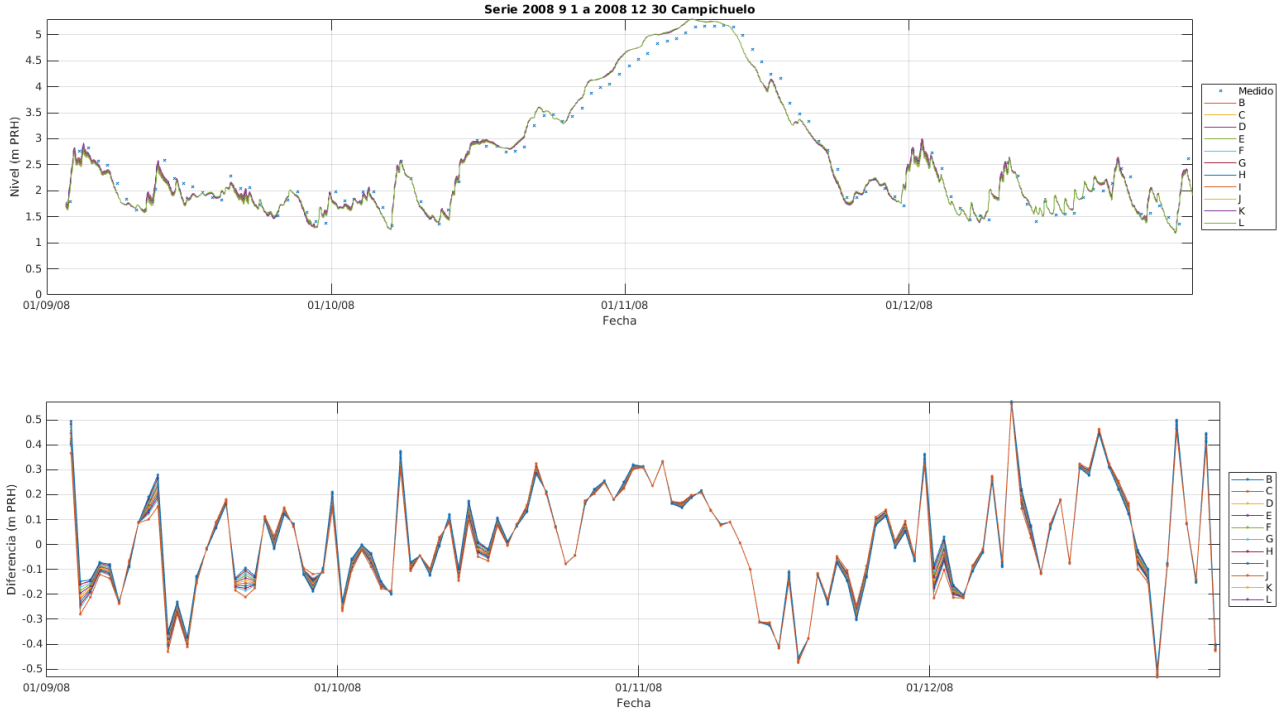


Figura 4.77: Arriba: comparación de series de niveles. Abajo: sesgo. - Campichuelo.

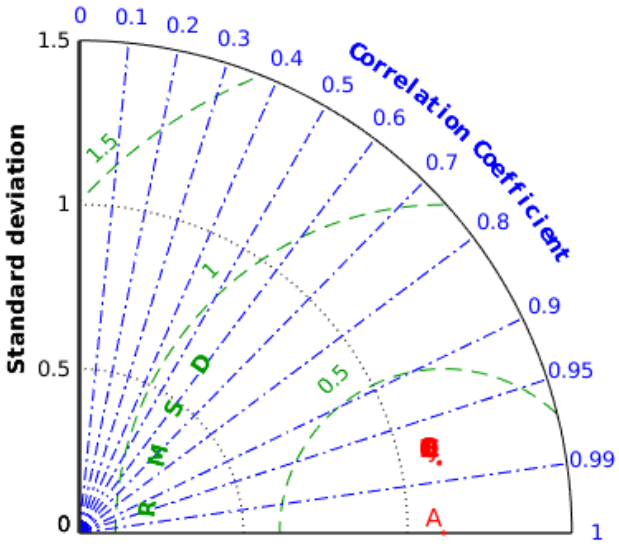


Figura 4.78: Diagrama de Taylor - Campichuelo.

4.3.11. Fray Bentos

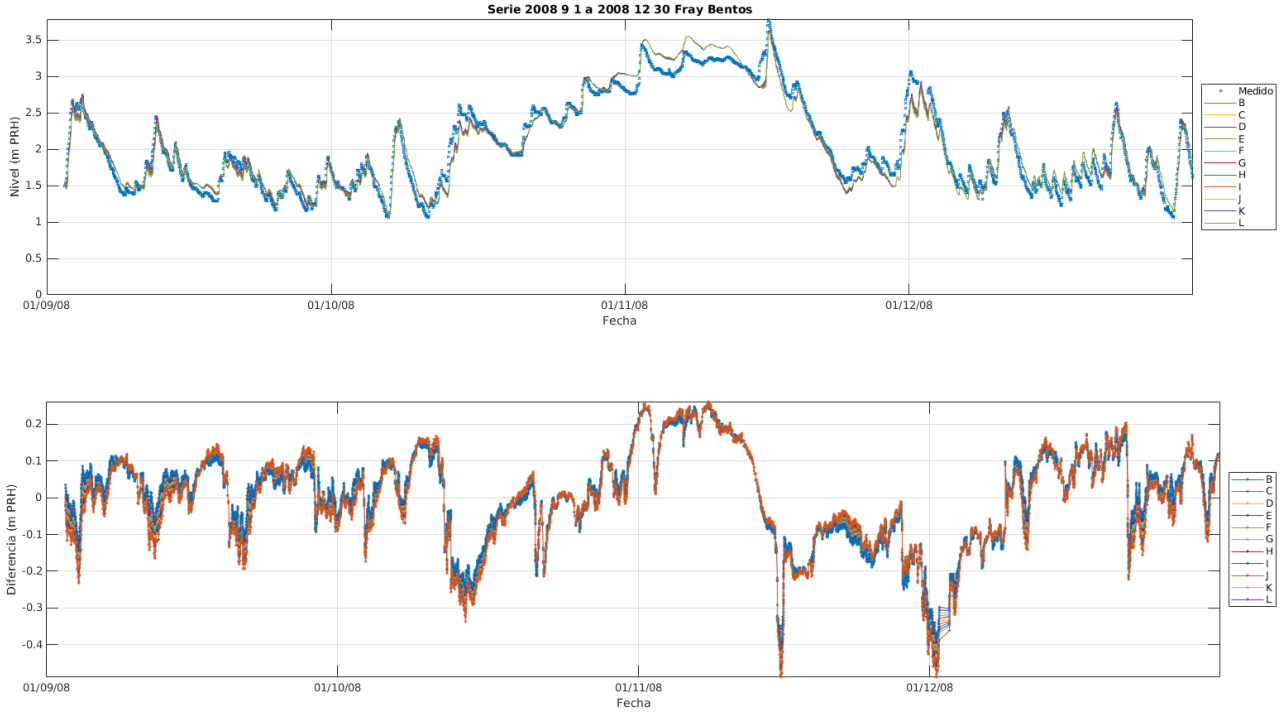


Figura 4.79: Arriba: comparación de series de niveles. Abajo: sesgo. - Fray Bentos.

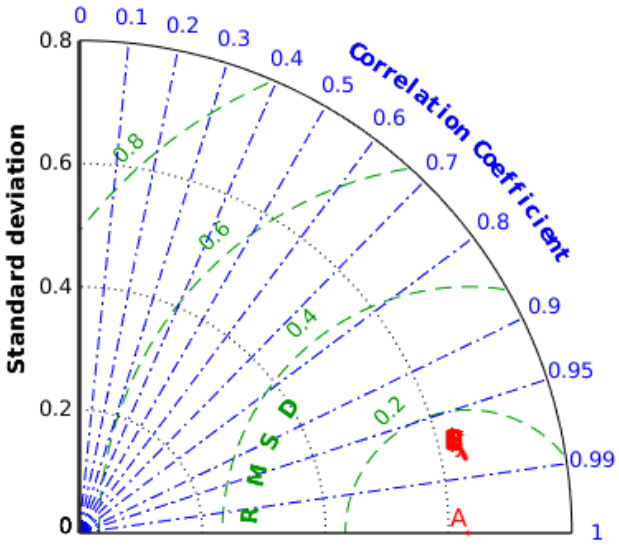


Figura 4.80: Diagrama de Taylor - Fray Bentos.

4.3.12. Gualeguaychú

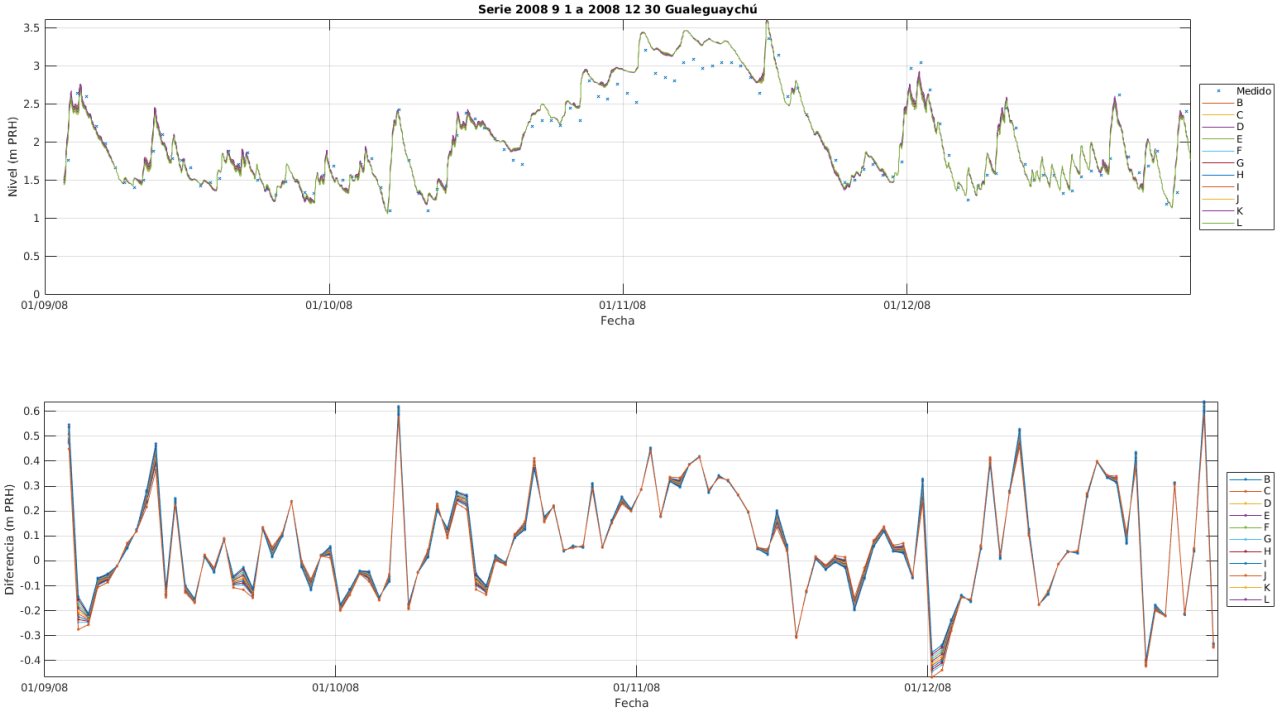


Figura 4.81: Arriba: comparación de series de niveles. Abajo: sesgo. - Gualeguaychú.

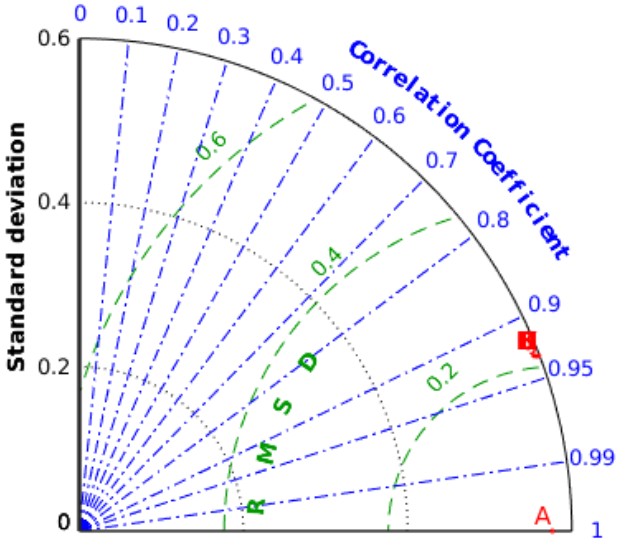


Figura 4.82: Diagrama de Taylor - Gualeguaychú.

4.3.13. Nueva Palmira

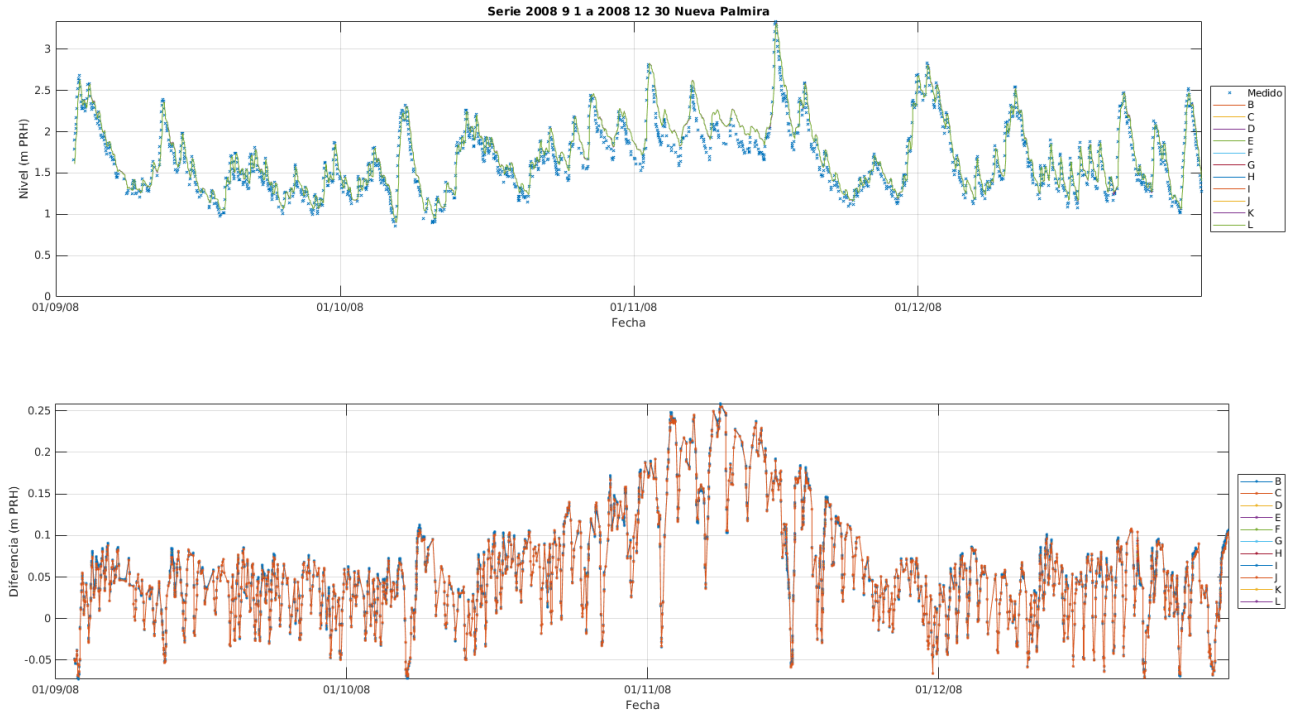


Figura 4.83: Arriba: comparación de series de niveles. Abajo: sesgo. - Nueva Palmira.

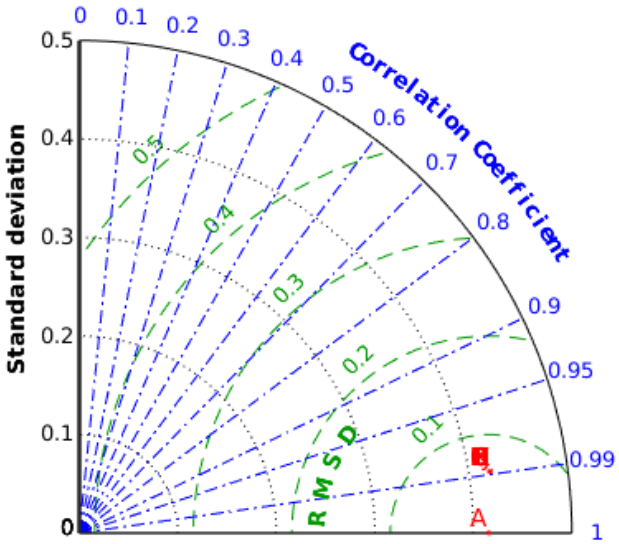


Figura 4.84: Diagrama de Taylor - Nueva Palmira.

4.3.14. Indicadores

En esta sección se presentan los parámetros indicadores utilizados, tanto por estación como globales, para determinar el ajuste del modelo a las series medidas. A saber: error RMS, coeficiente de correlación, sesgo e $IND = (ERMS + abs(SESGO))/(CORCOEF \times STD)$.

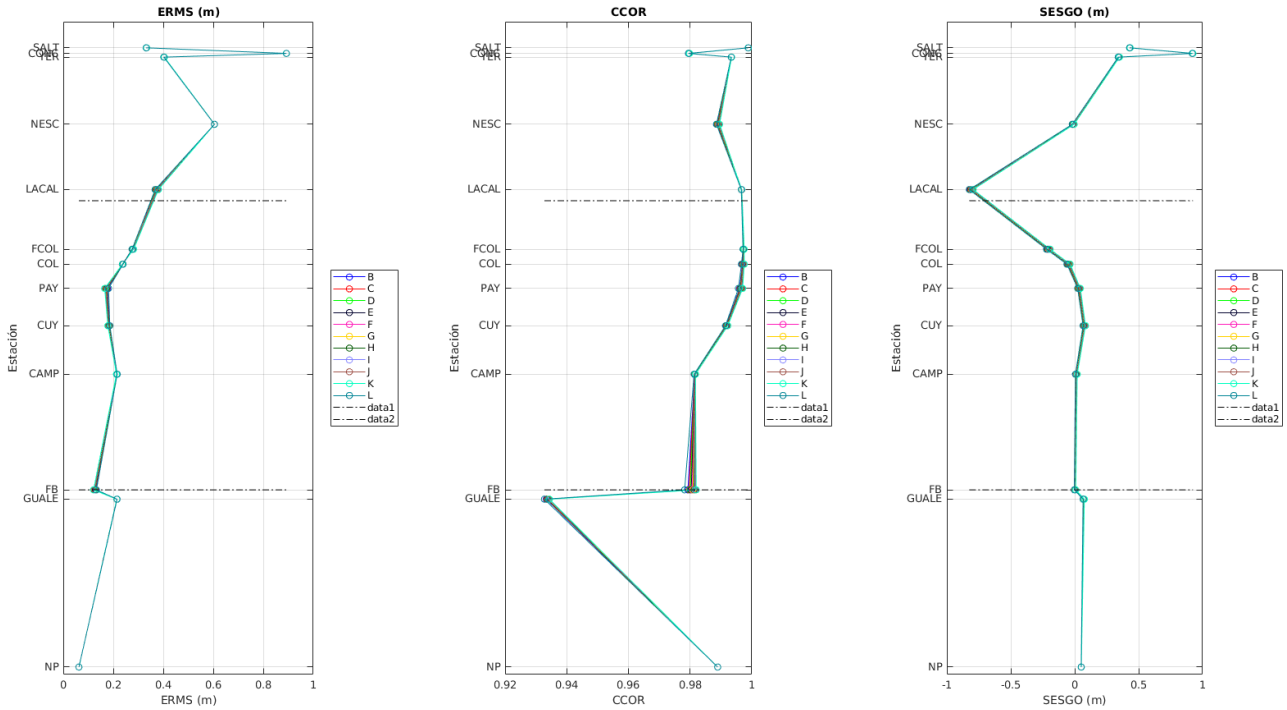


Figura 4.85: Error RMS, coeficiente de correlación y sesgo para cada estación por corrida.

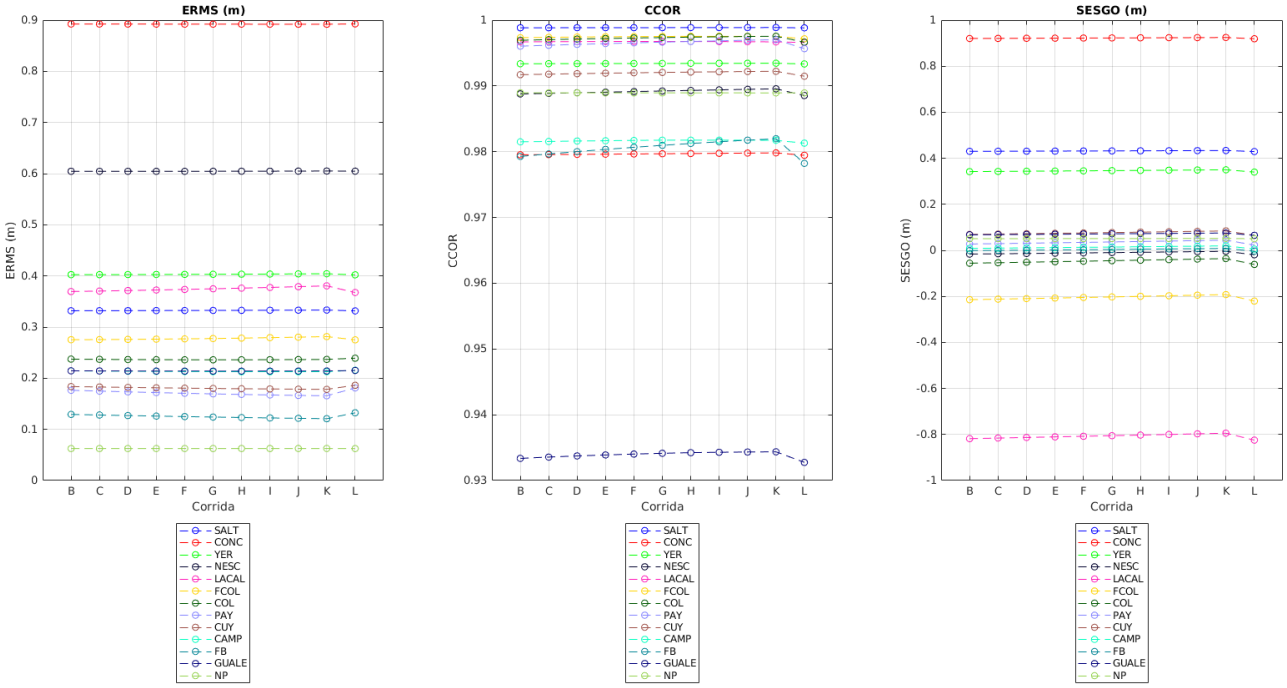


Figura 4.86: Error RMS, coeficiente de correlación y sesgo para cada corrida por estación.

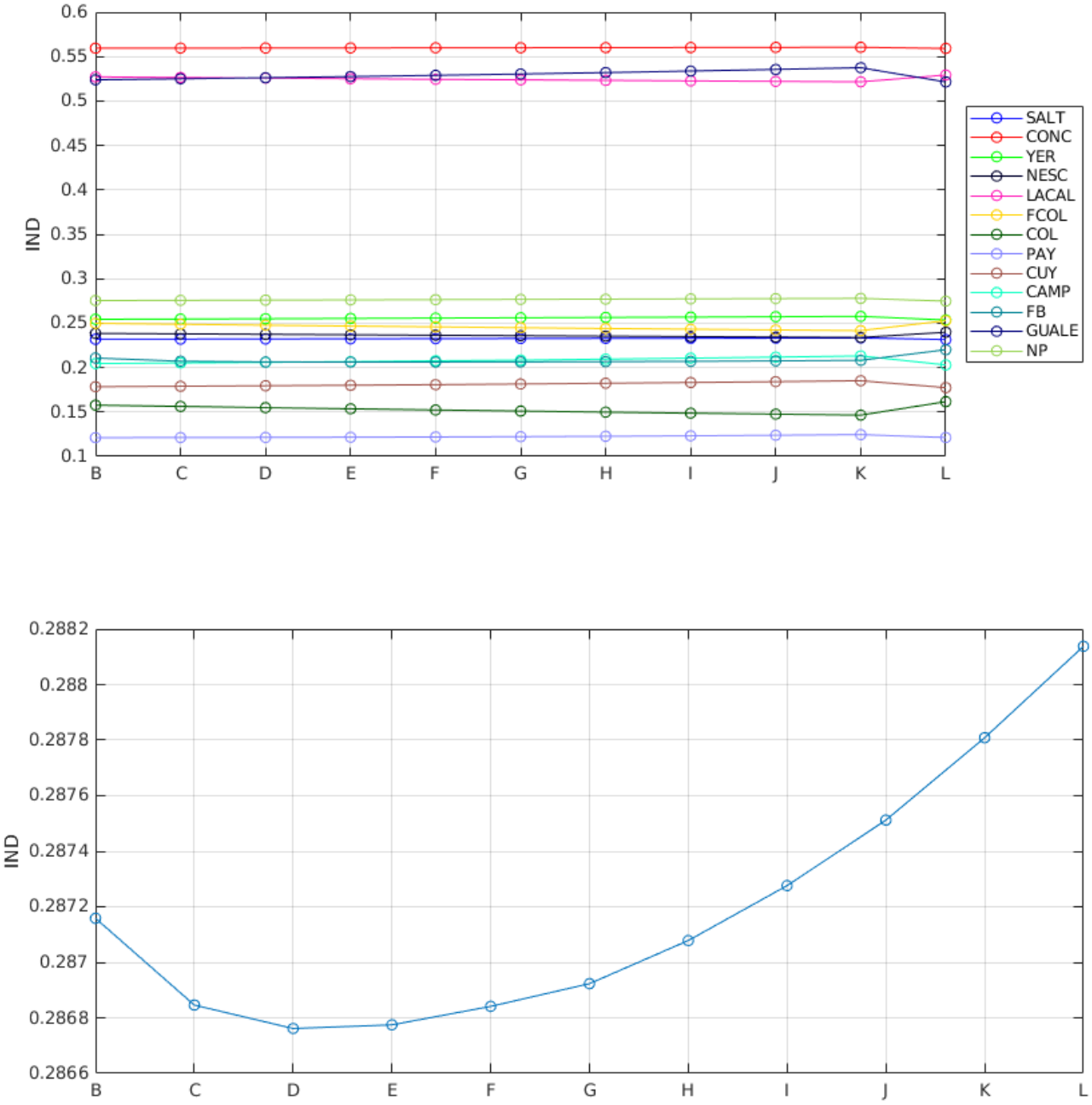


Figura 4.87: IND por estación y corrida (arriba) e IND global promedio por corrida (abajo).

Apéndice 5

Análisis de calidad de simulaciones

En este apéndice se presentan las series de niveles simulados por año y por estación, comparando las mismas con los datos medidos en cada estación, tanto gráficamente como mediante un diagrama de Taylor. Para cada año de simulación se presenta además el error RMS, coeficiente de correlación y sesgo para cada estación.

5.1. 2004

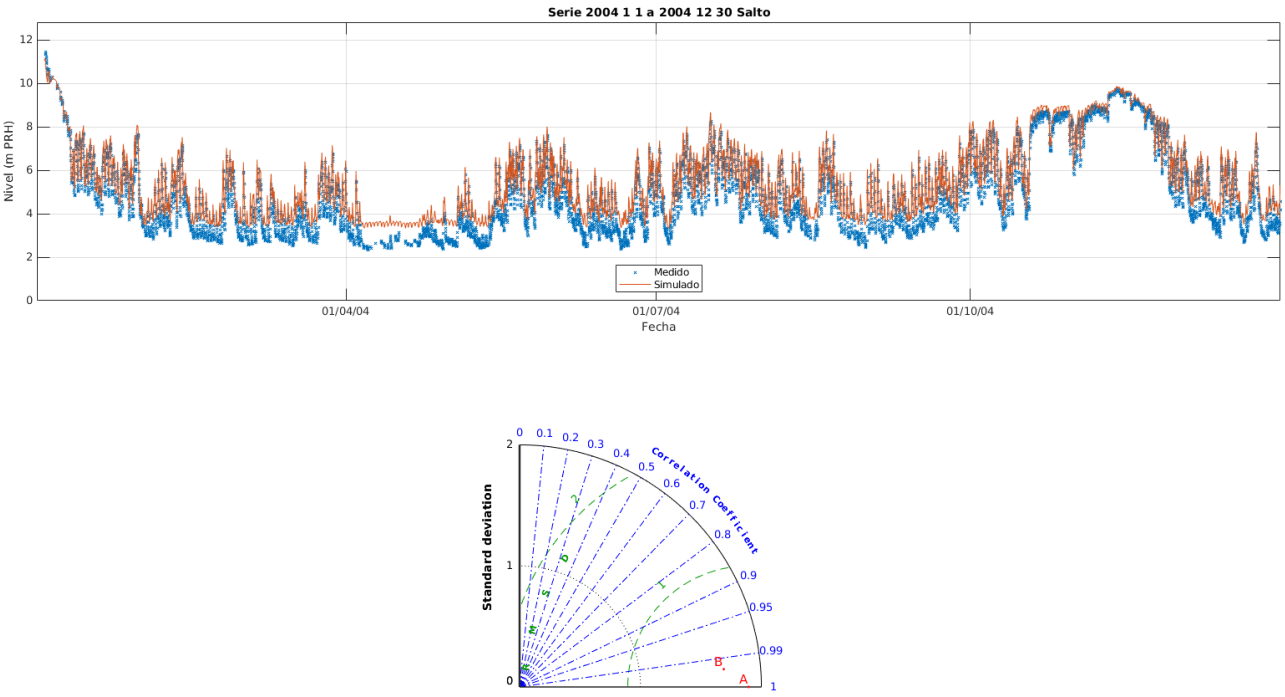


Figura 5.1: Series de niveles medidas y simuladas (arriba), diagrama de Taylor (abajo) - Salto - 2004.

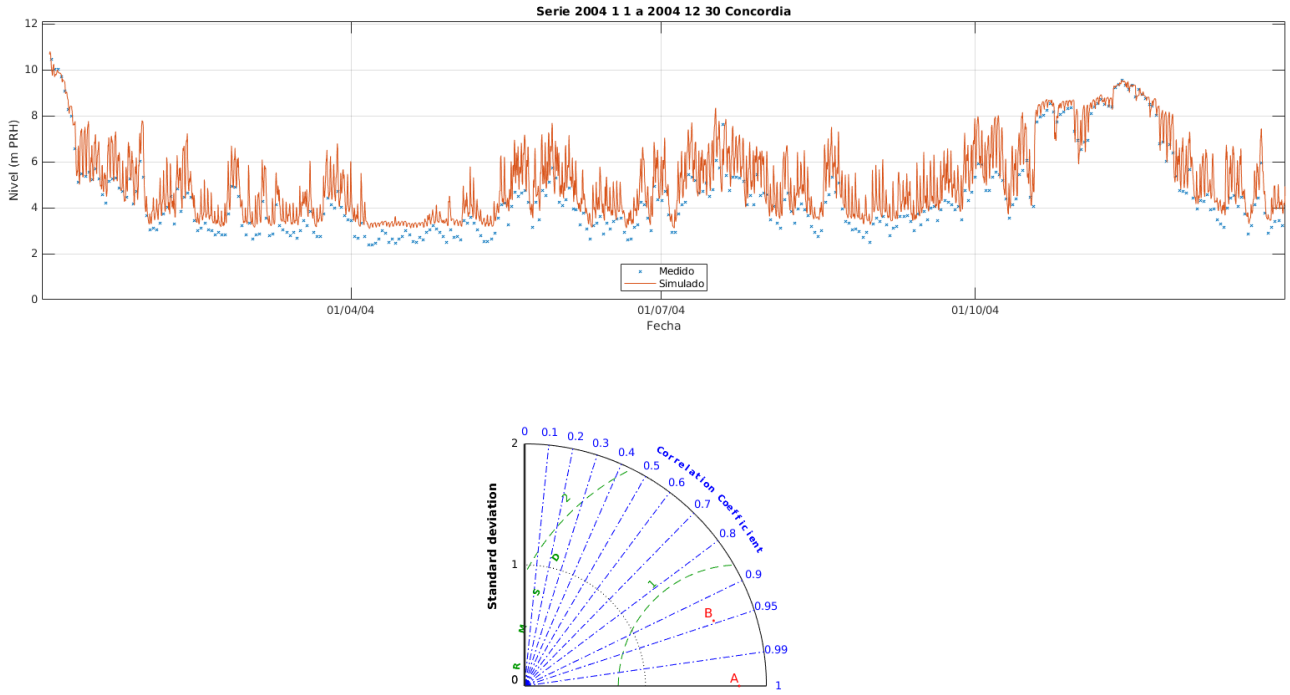


Figura 5.2: Series de niveles medidas y simuladas (arriba), diagrama de Taylor (abajo) - Concordia - 2004.

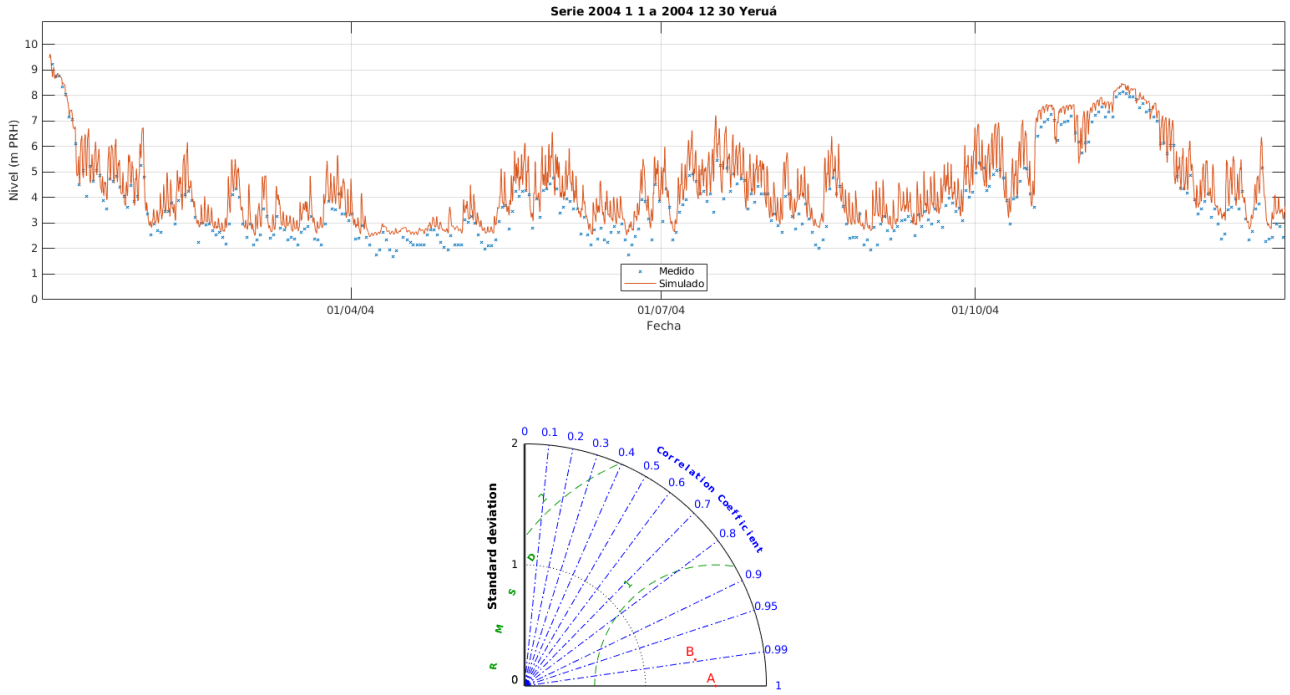


Figura 5.3: Series de niveles medidas y simuladas (arriba), diagrama de Taylor (abajo) - Yerúa - 2004.

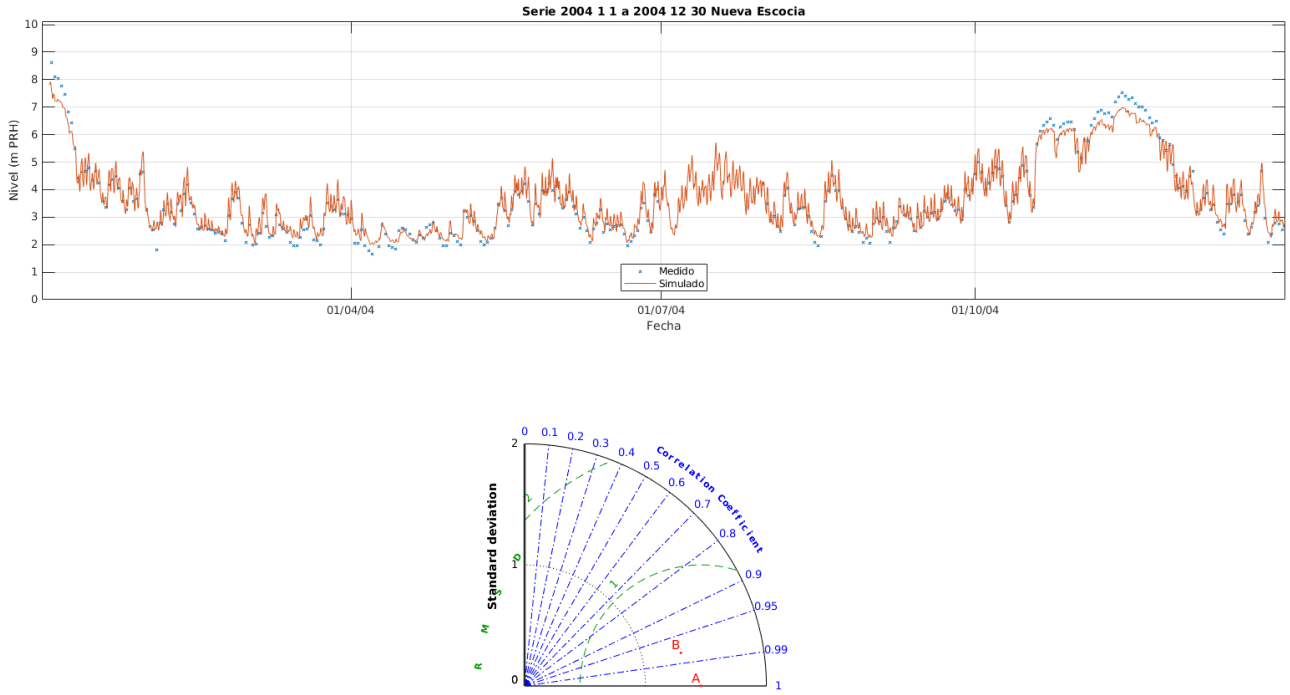


Figura 5.4: Series de niveles medidas y simuladas (arriba), diagrama de Taylor (abajo) - Nueva Escocia - 2004.

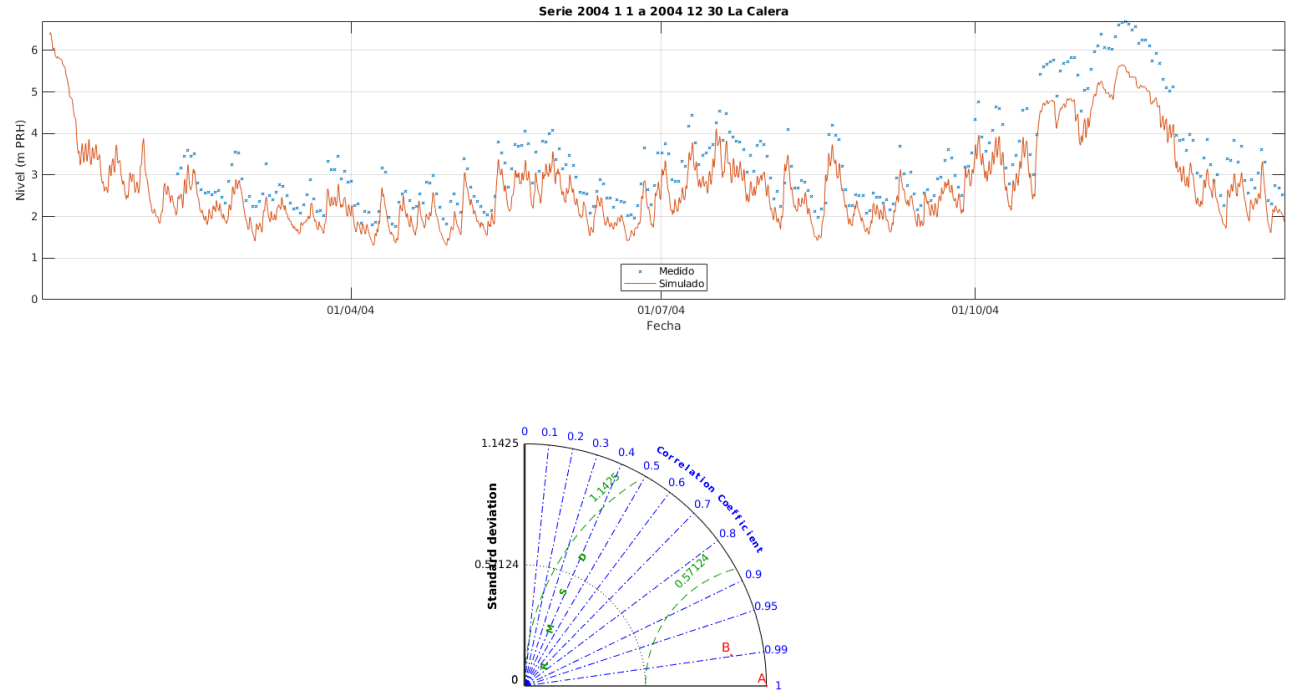


Figura 5.5: Series de niveles medidas y simuladas (arriba), diagrama de Taylor (abajo) - La Calera - 2004.

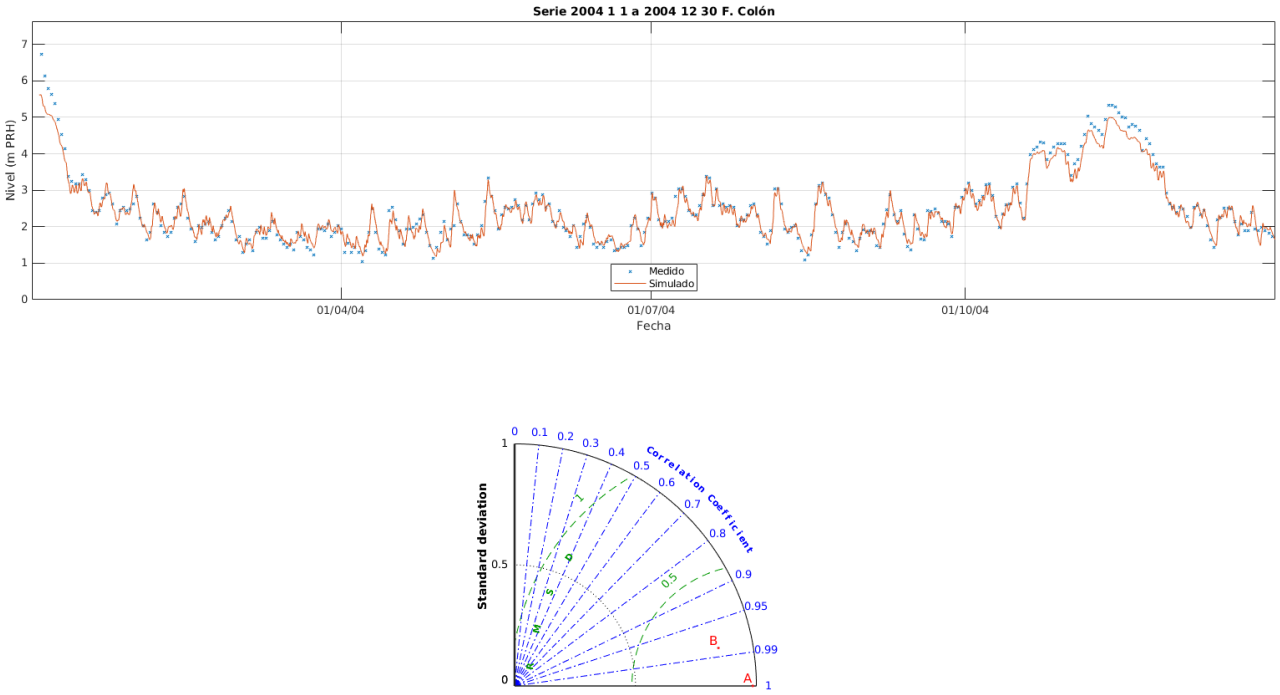


Figura 5.6: Series de niveles medidas y simuladas (arriba), diagrama de Taylor (abajo) - Fábrica Colón - 2004.

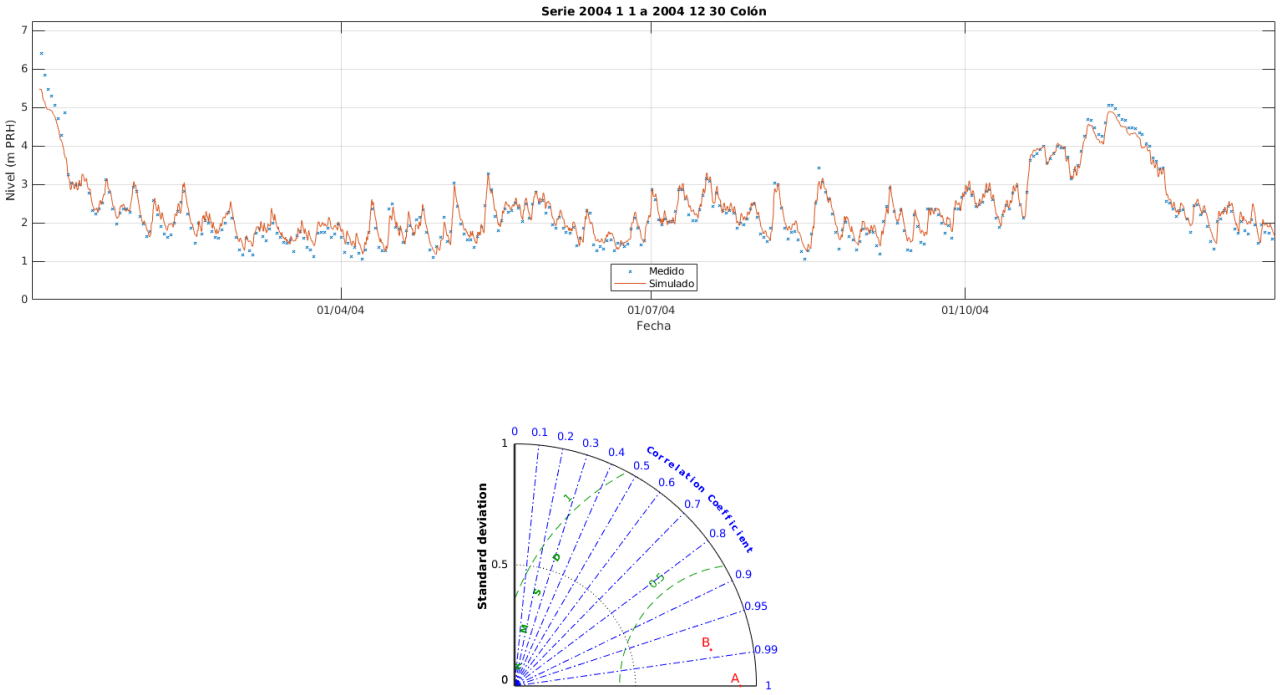


Figura 5.7: Series de niveles medidas y simuladas (arriba), diagrama de Taylor (abajo) - Colón - 2004.

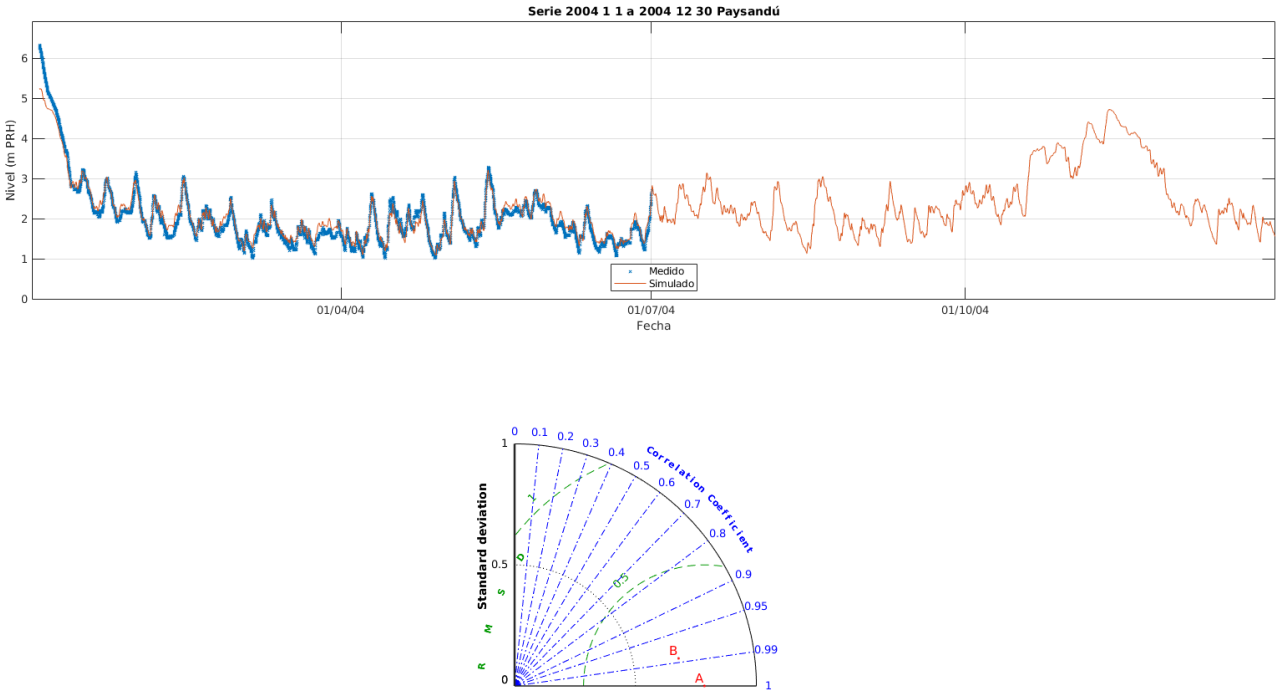


Figura 5.8: Series de niveles medidas y simuladas (arriba), diagrama de Taylor (abajo) - Paysandú - 2004.

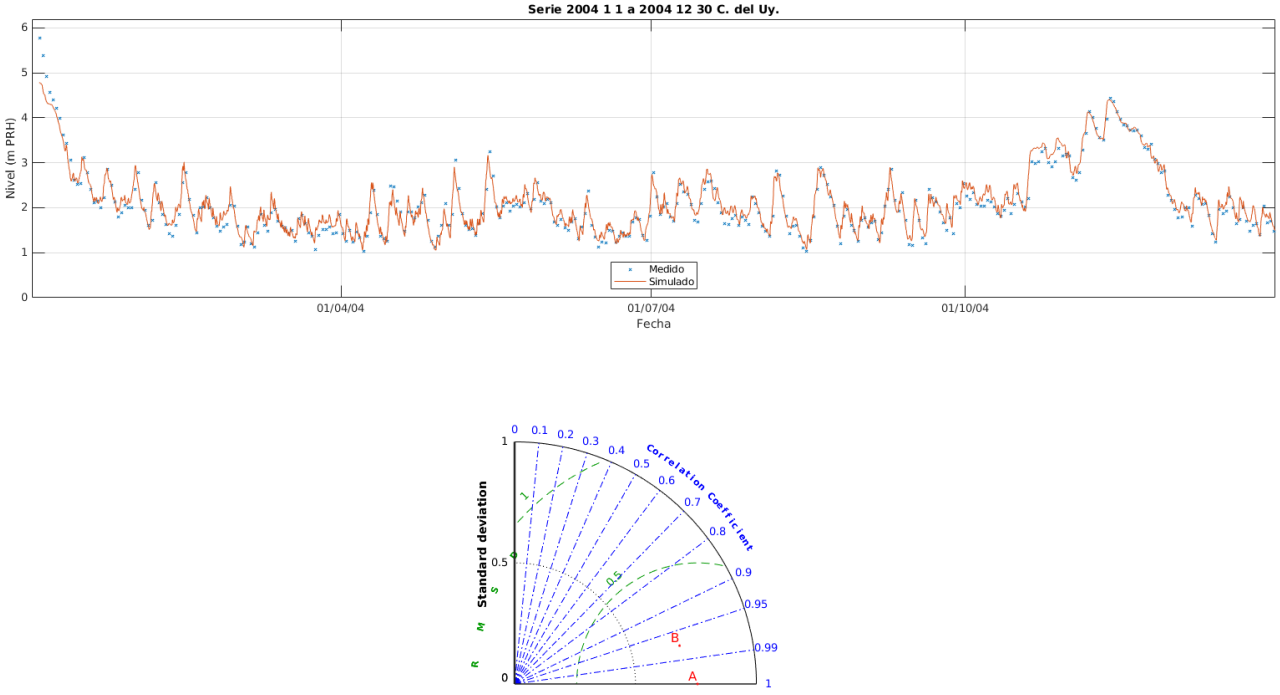


Figura 5.9: Series de niveles medidas y simuladas (arriba), diagrama de Taylor (abajo) - Concepción del Uruguay - 2004.

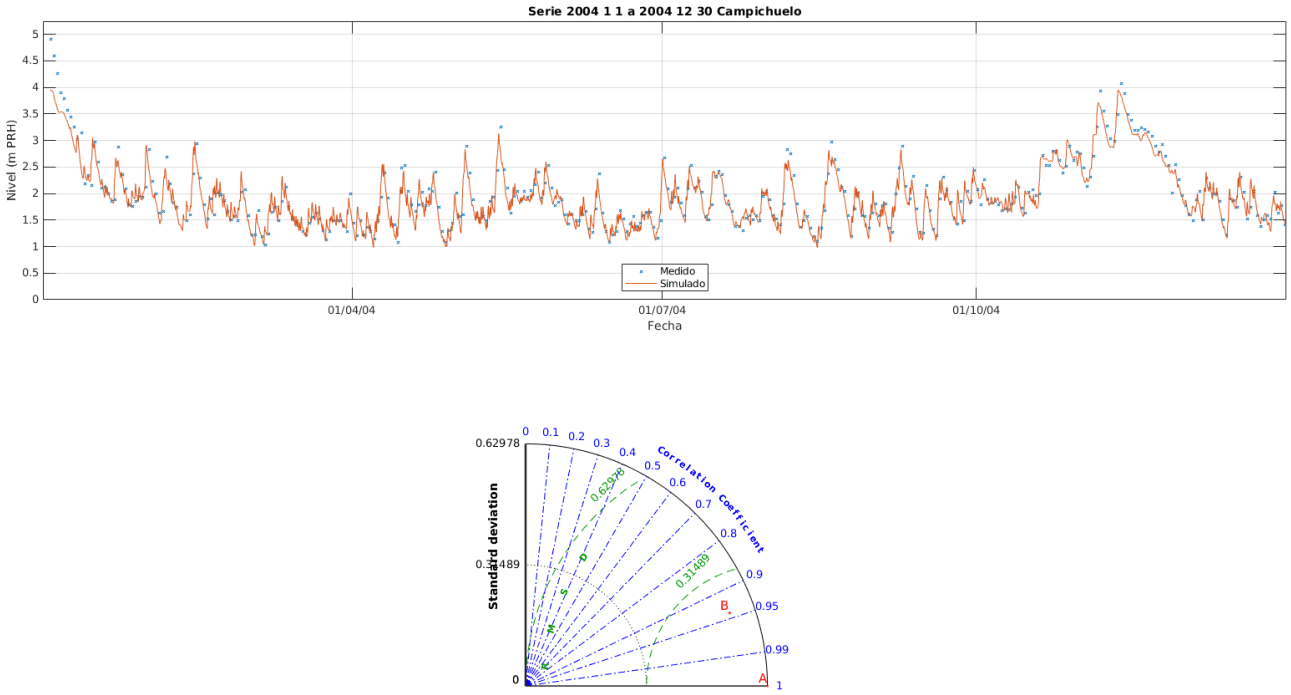


Figura 5.10: Series de niveles medidas y simuladas (arriba), diagrama de Taylor (abajo) - Campichuelo - 2004.

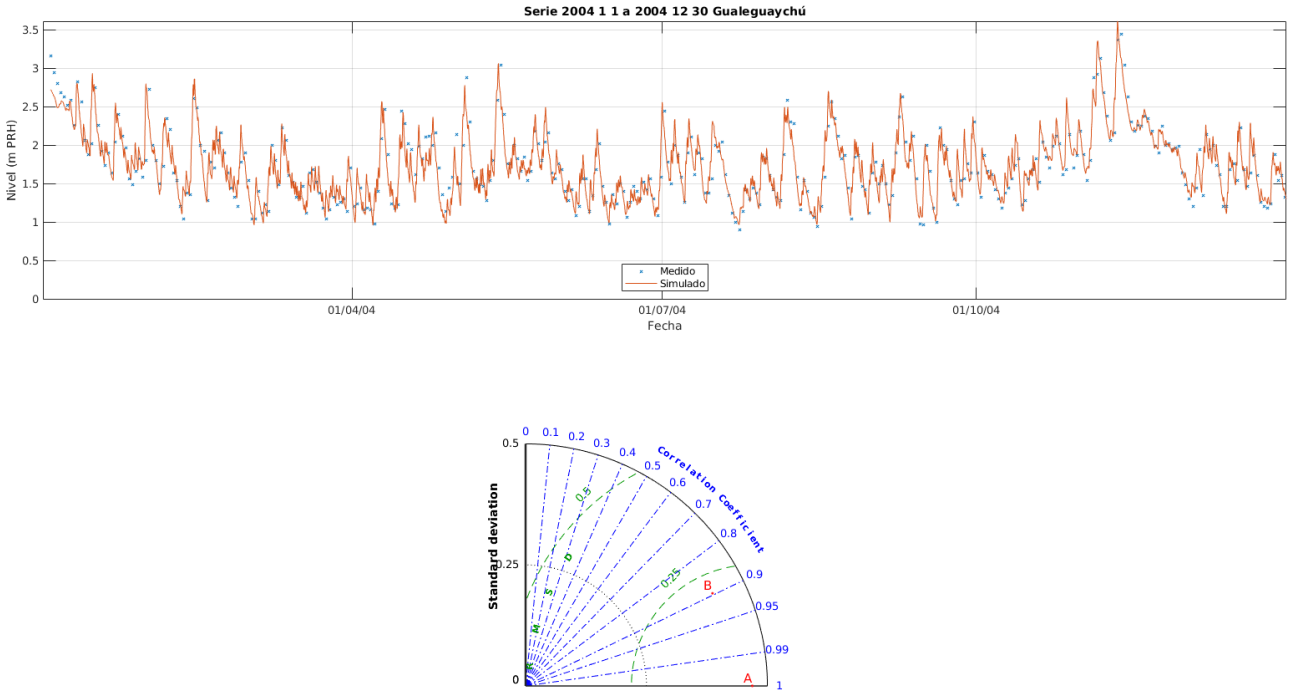


Figura 5.11: Series de niveles medidas y simuladas (arriba), diagrama de Taylor (abajo) - Gualeguaychú - 2004.

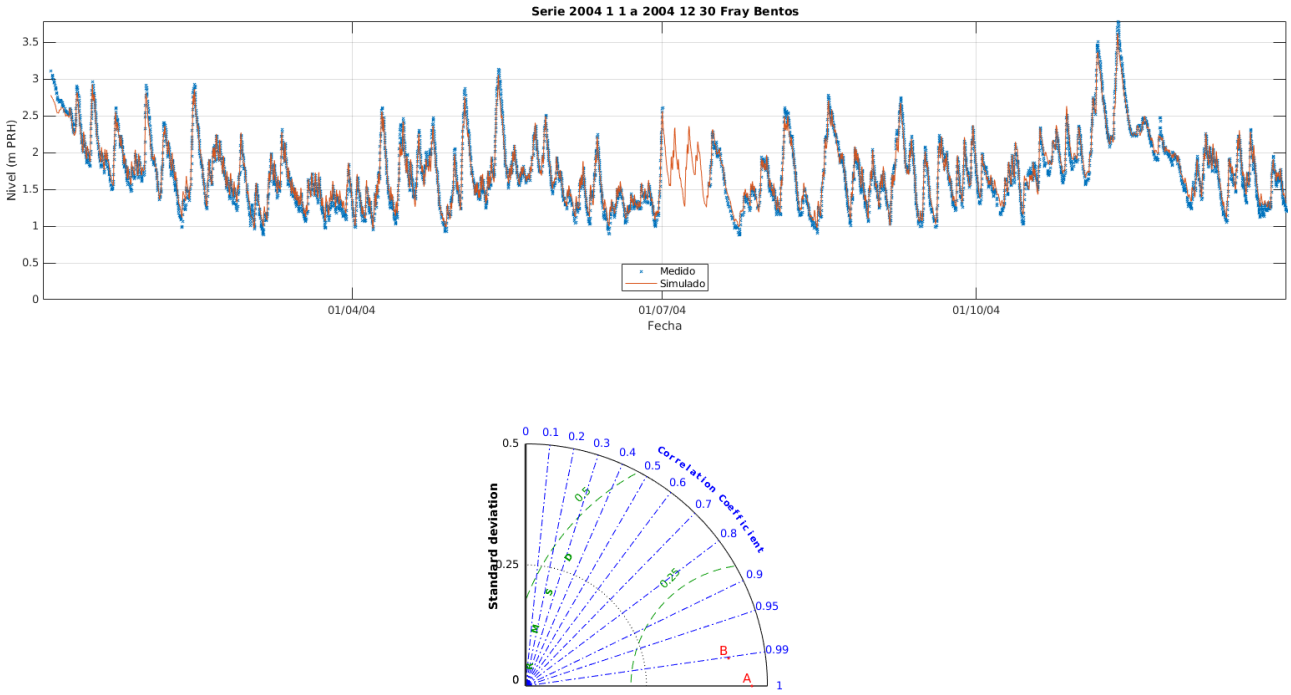


Figura 5.12: Series de niveles medidas y simuladas (arriba), diagrama de Taylor (abajo) - Fray Bentos - 2004.

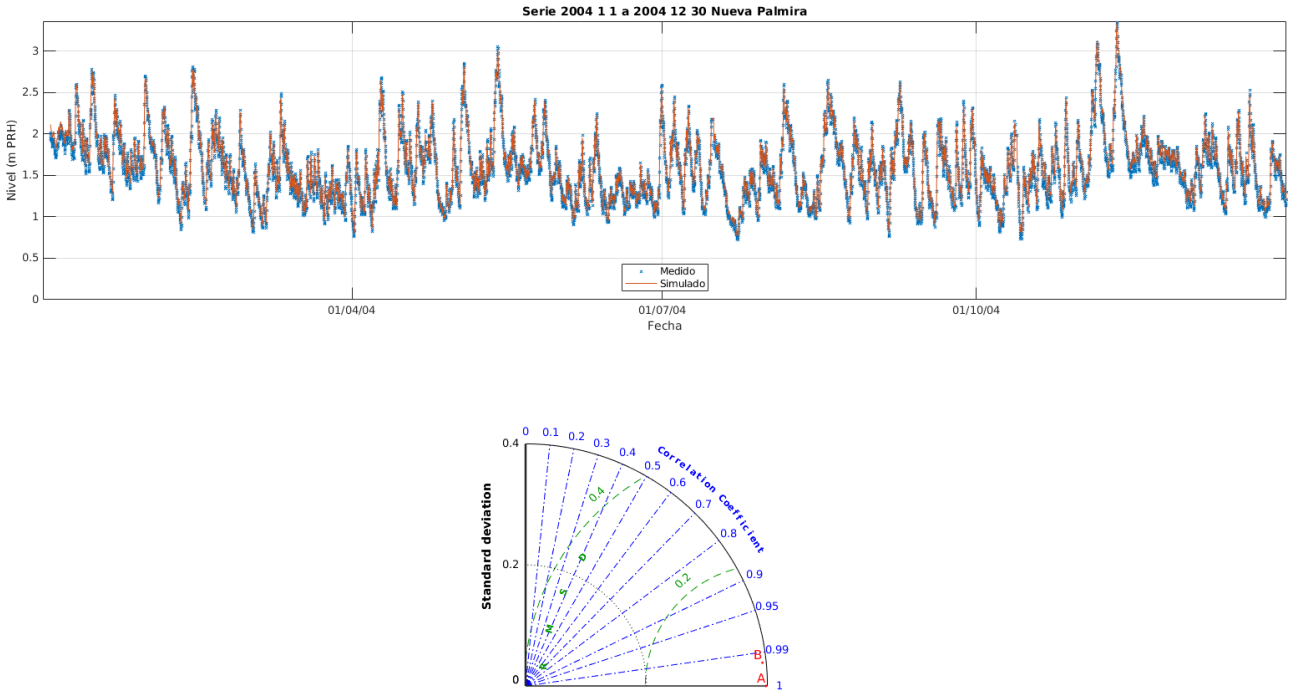


Figura 5.13: Series de niveles medidas y simuladas (arriba), diagrama de Taylor (abajo) - Nueva Palmira - 2004.

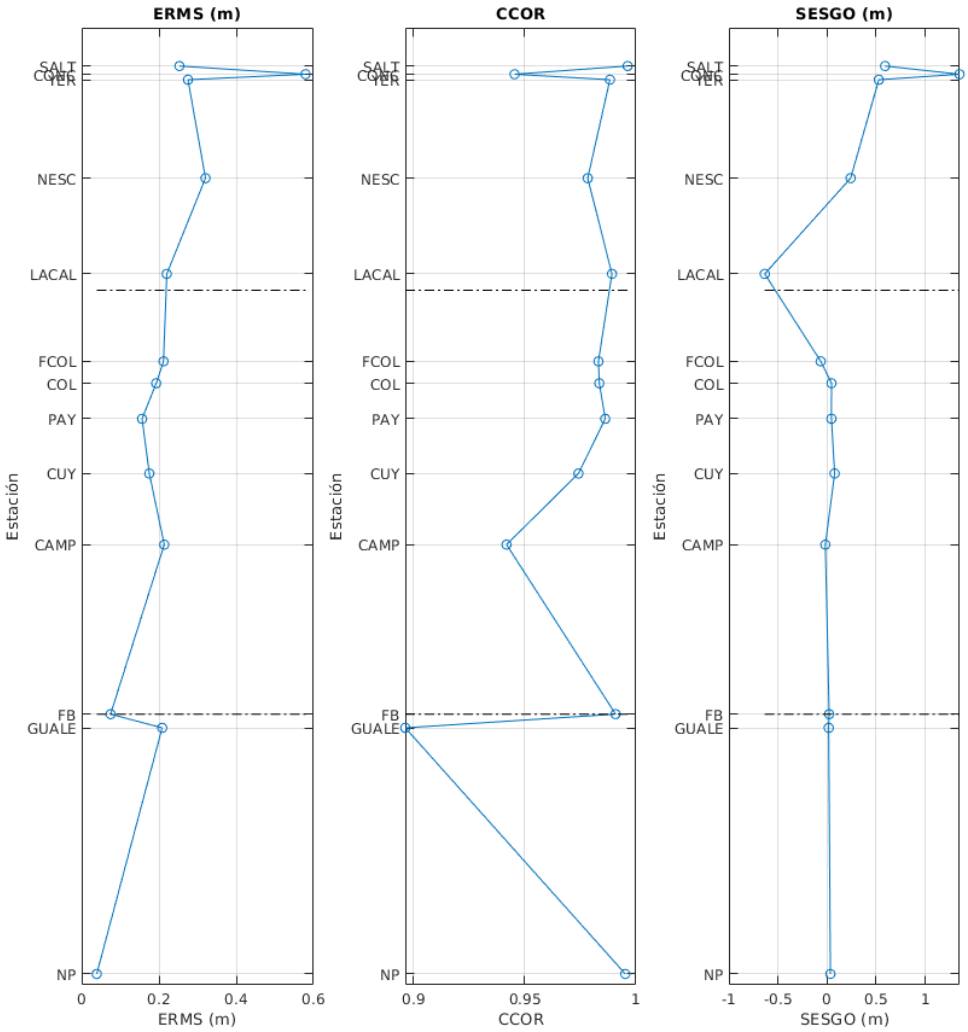


Figura 5.14: Error RMS (izquierda), coeficiente de correlación (medio), sesgo (derecha) - 2004.

Estación	ERMS	CCor	Sesgo	Media (m PRH)		STD (m)	
	(m)	-	(m)	Medida	Simulada	Medida	Simulada
Salto	0,25	0,996	0,59	5,04	5,48	1,89	1,70
Concordia	0,58	0,945	1,35	4,47	5,26	1,78	1,65
Yeruá	0,28	0,988	0,53	3,87	4,49	1,58	1,43
Nueva Escocia	0,32	0,978	0,24	3,61	3,69	1,46	1,32
La Calera	0,22	0,989	-0,63	3,31	2,76	1,14	0,99
F. Colón	0,21	0,983	-0,06	2,48	2,42	0,99	0,86
Colón	0,19	0,984	0,05	2,32	2,38	0,93	0,83
Paysandú	0,16	0,986	0,04	2,04	2,30	0,79	0,69
C. del Uruguay	0,18	0,974	0,08	2,10	2,15	0,76	0,70
Campichuelo	0,21	0,942	-0,02	1,98	1,94	0,63	0,56
Fray Bentos	0,07	0,991	0,02	1,75	1,75	0,47	0,42
Gualeguaychú	0,21	0,896	0,02	1,74	1,75	0,47	0,43
Nueva Palmira	0,04	0,995	0,03	1,58	1,61	0,40	0,39

Tabla 5.1: Resumen de indicadores de calidad de ajuste y parámetros estadísticos de comparación entre series medidas y simuladas para 2004.

5.2. 2005

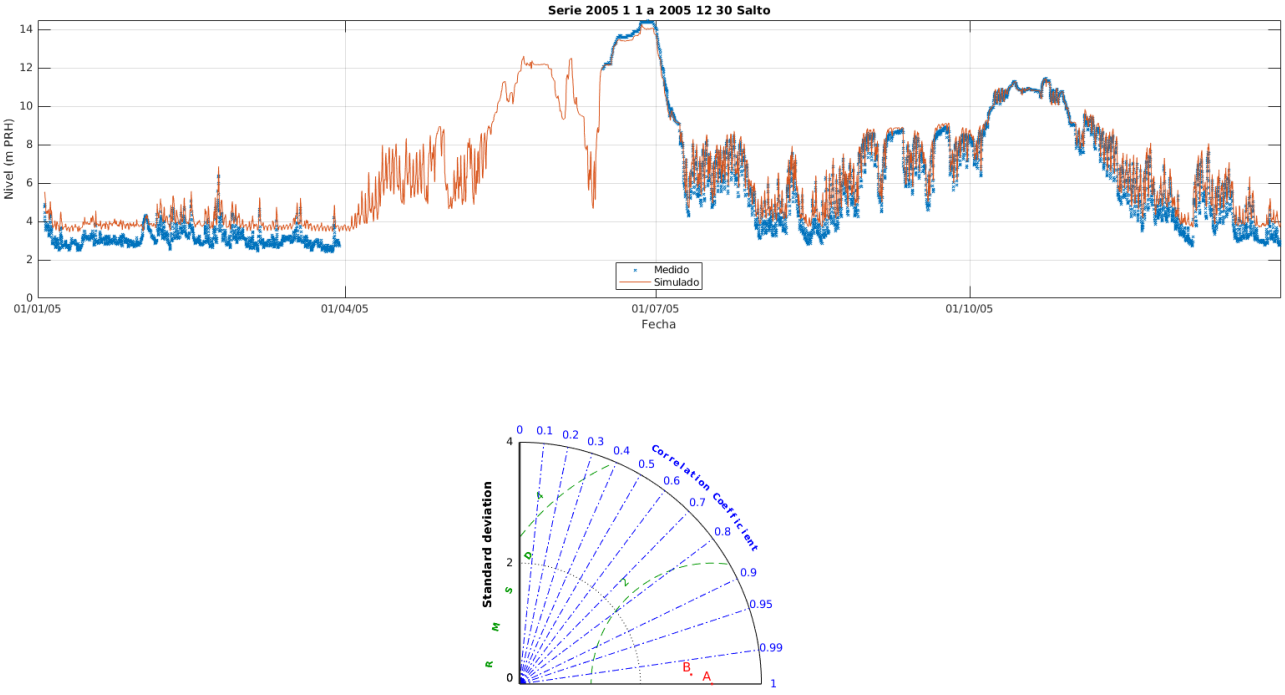


Figura 5.15: Series de niveles medidas y simuladas (arriba), diagrama de Taylor (abajo) - Salto - 2005.

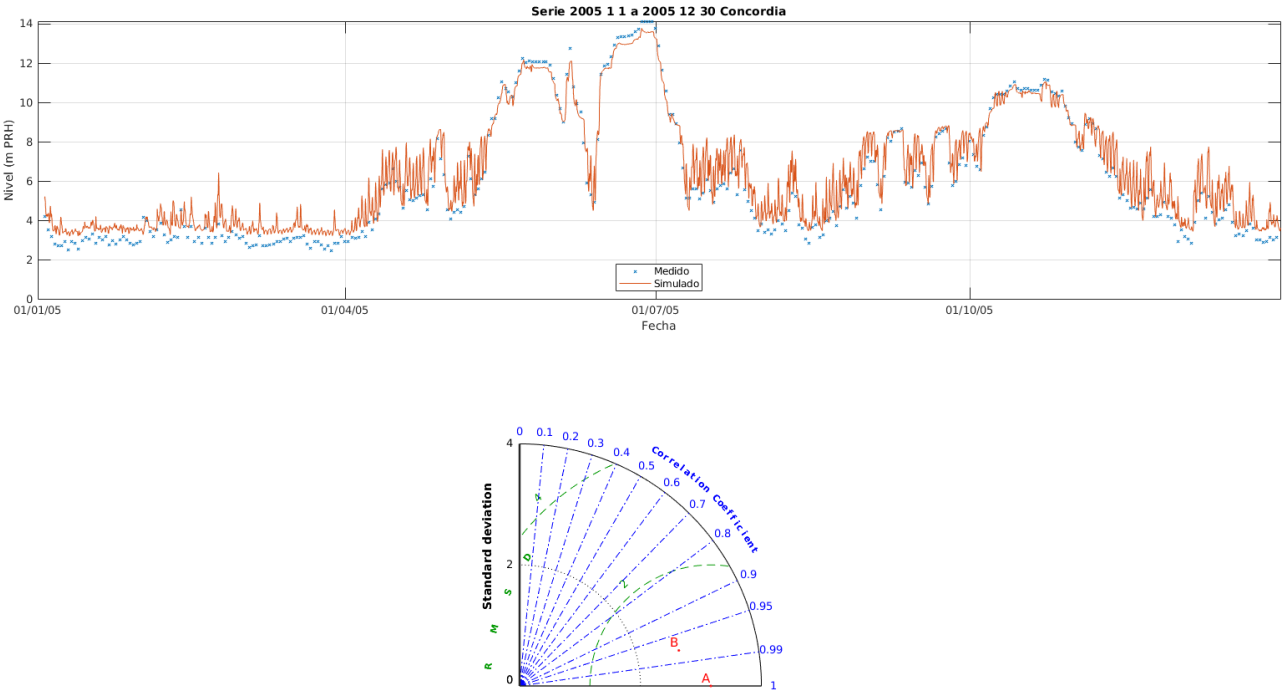


Figura 5.16: Series de niveles medidas y simuladas (arriba), diagrama de Taylor (abajo) - Concordia - 2005.

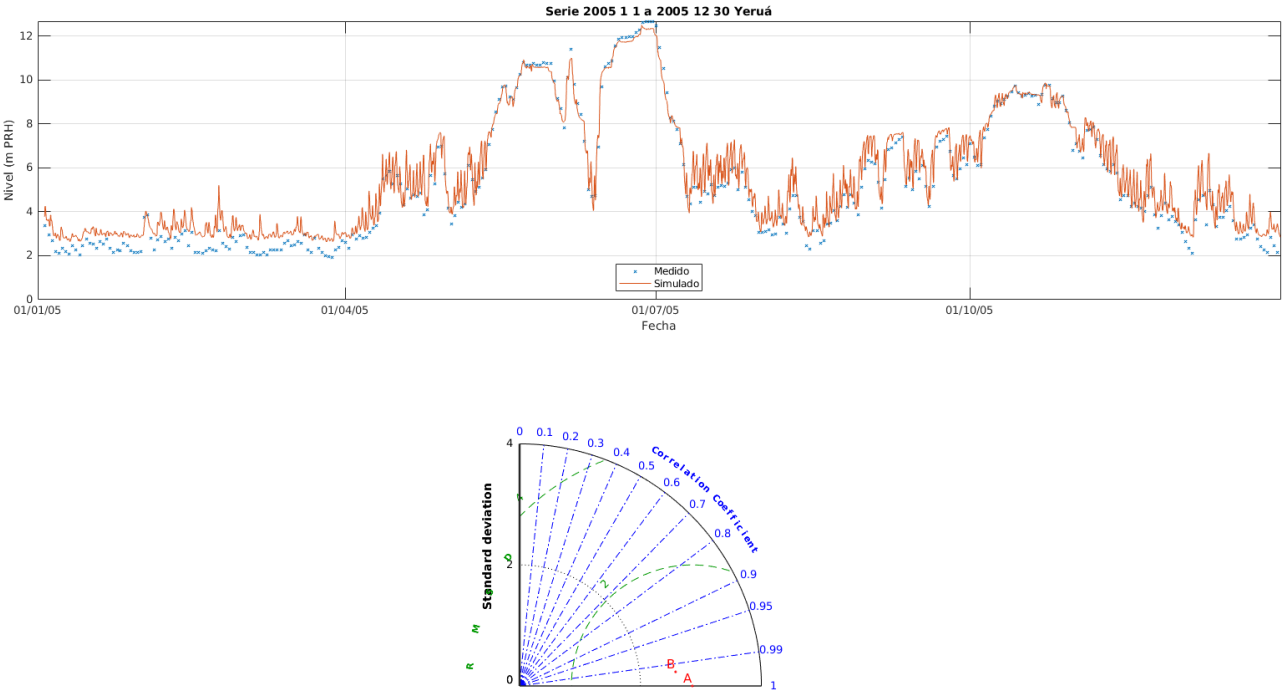


Figura 5.17: Series de niveles medidas y simuladas (arriba), diagrama de Taylor (abajo) - Yerúa - 2005.

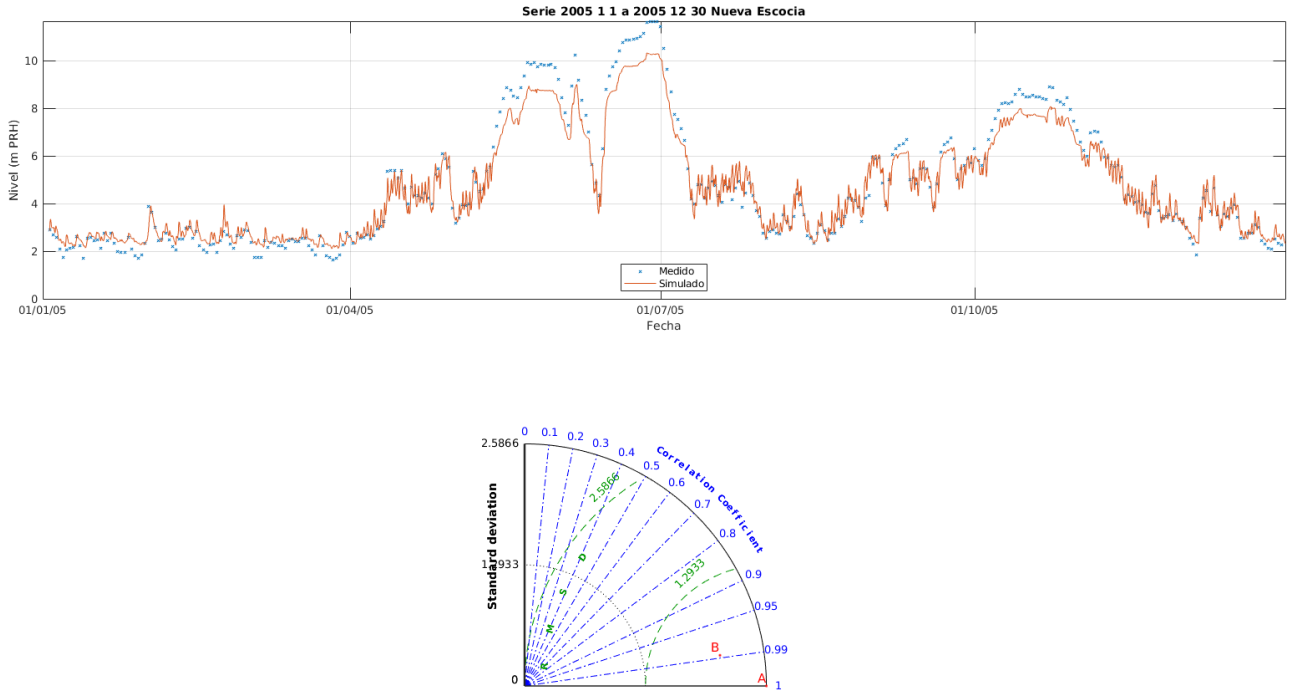


Figura 5.18: Series de niveles medidas y simuladas (arriba), diagrama de Taylor (abajo) - Nueva Escocia - 2005.

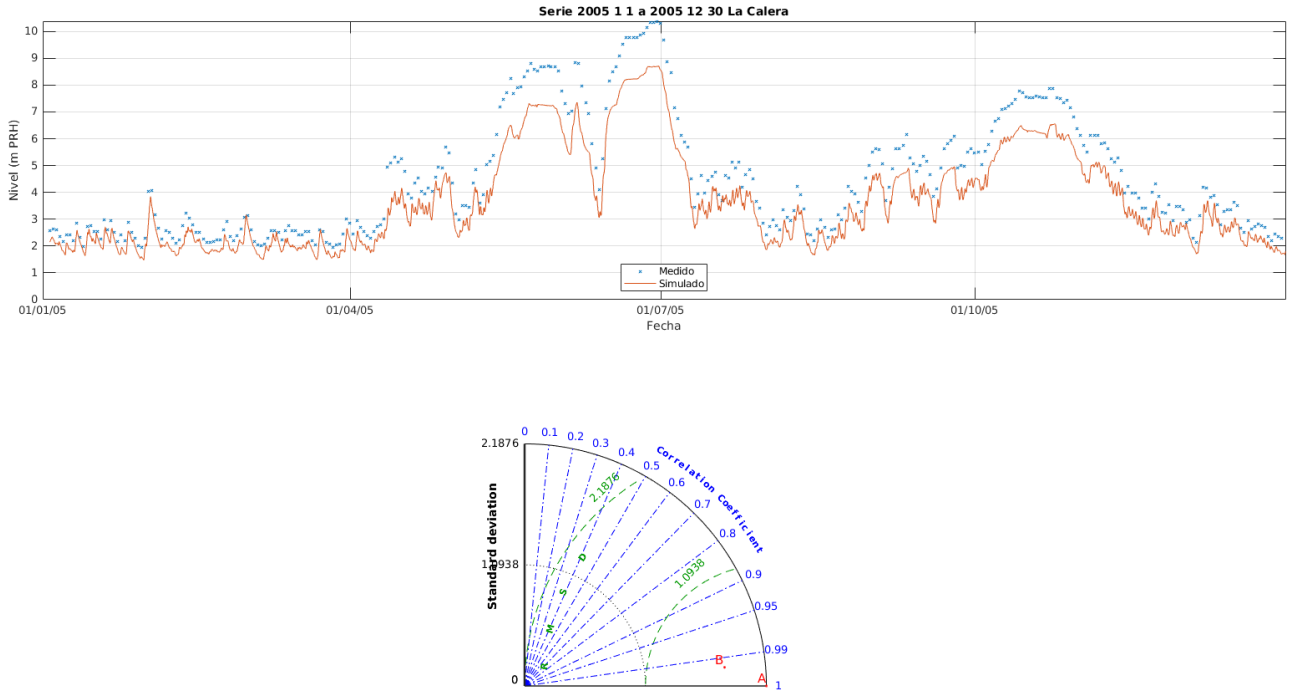


Figura 5.19: Series de niveles medidas y simuladas (arriba), diagrama de Taylor (abajo) - La Calera - 2005.

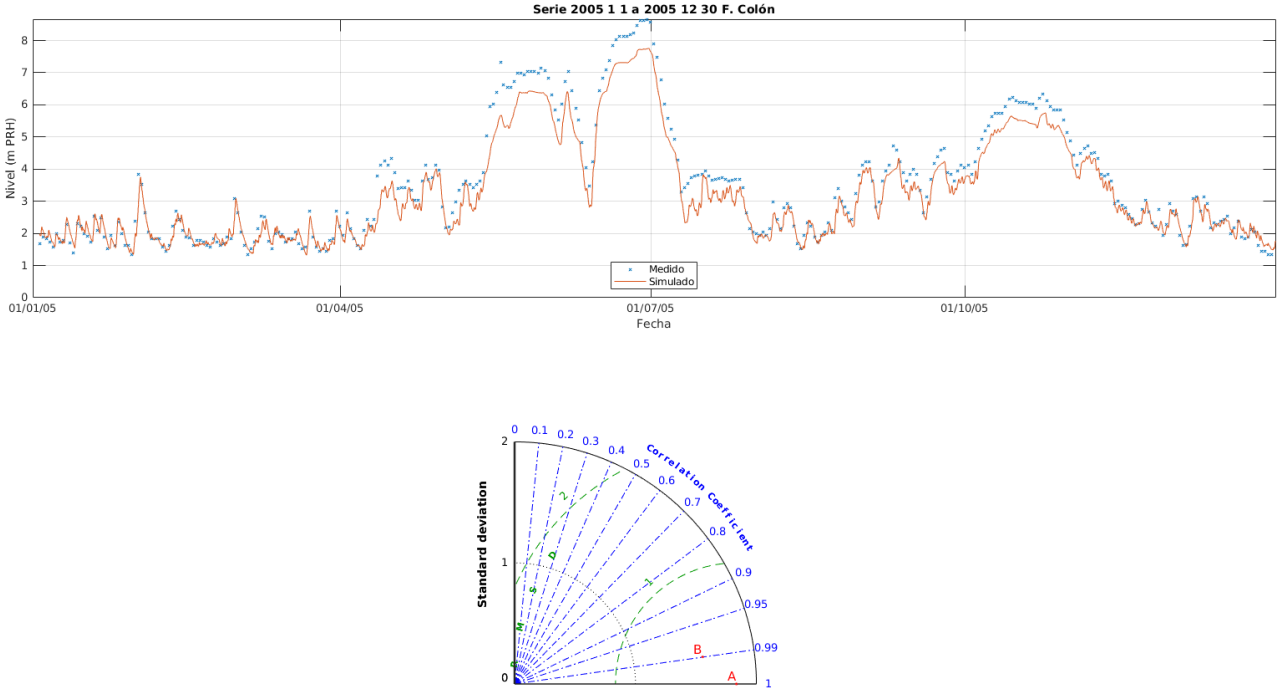


Figura 5.20: Series de niveles medidas y simuladas (arriba), diagrama de Taylor (abajo) - Fábrica Colón - 2005.

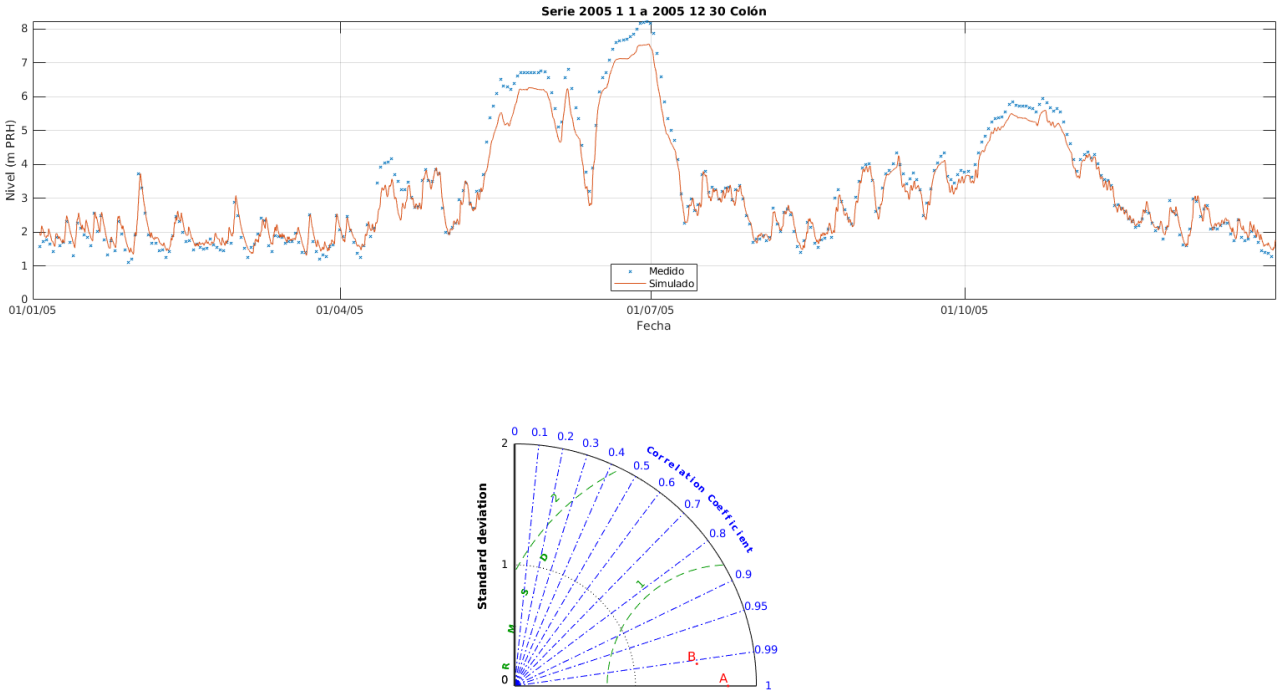


Figura 5.21: Series de niveles medidas y simuladas (arriba), diagrama de Taylor (abajo) - Colón - 2005.

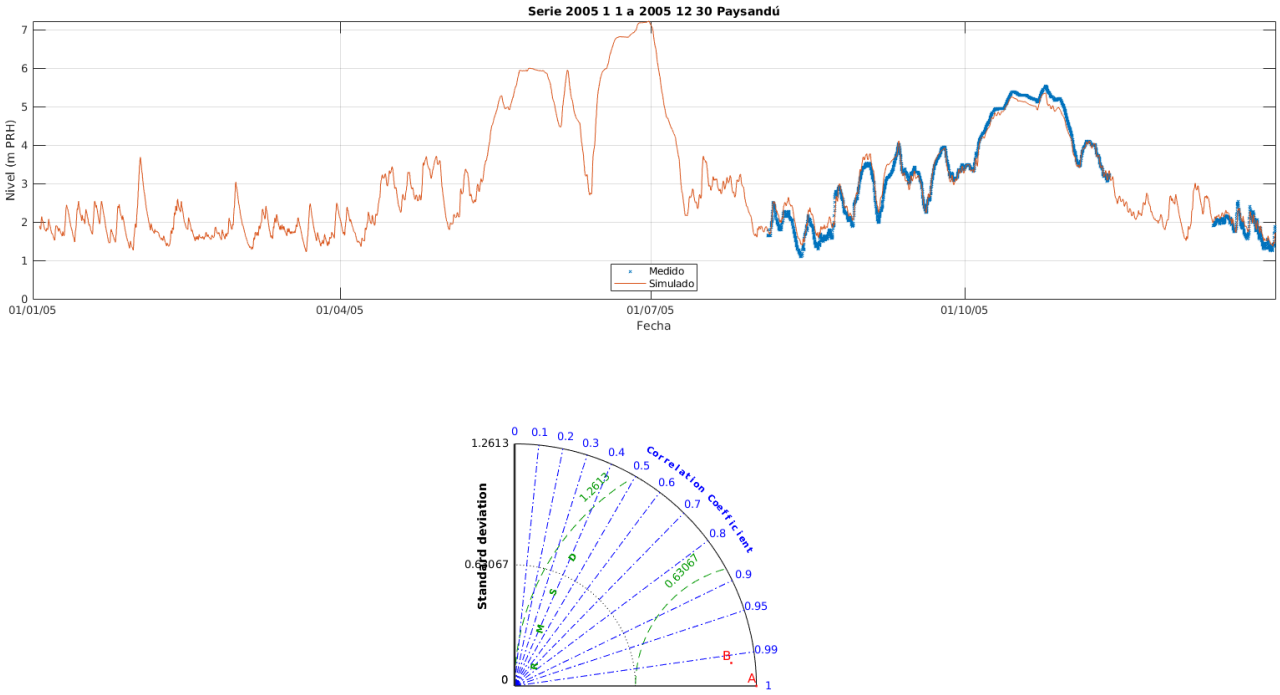


Figura 5.22: Series de niveles medidas y simuladas (arriba), diagrama de Taylor (abajo) - Paysandú - 2005.

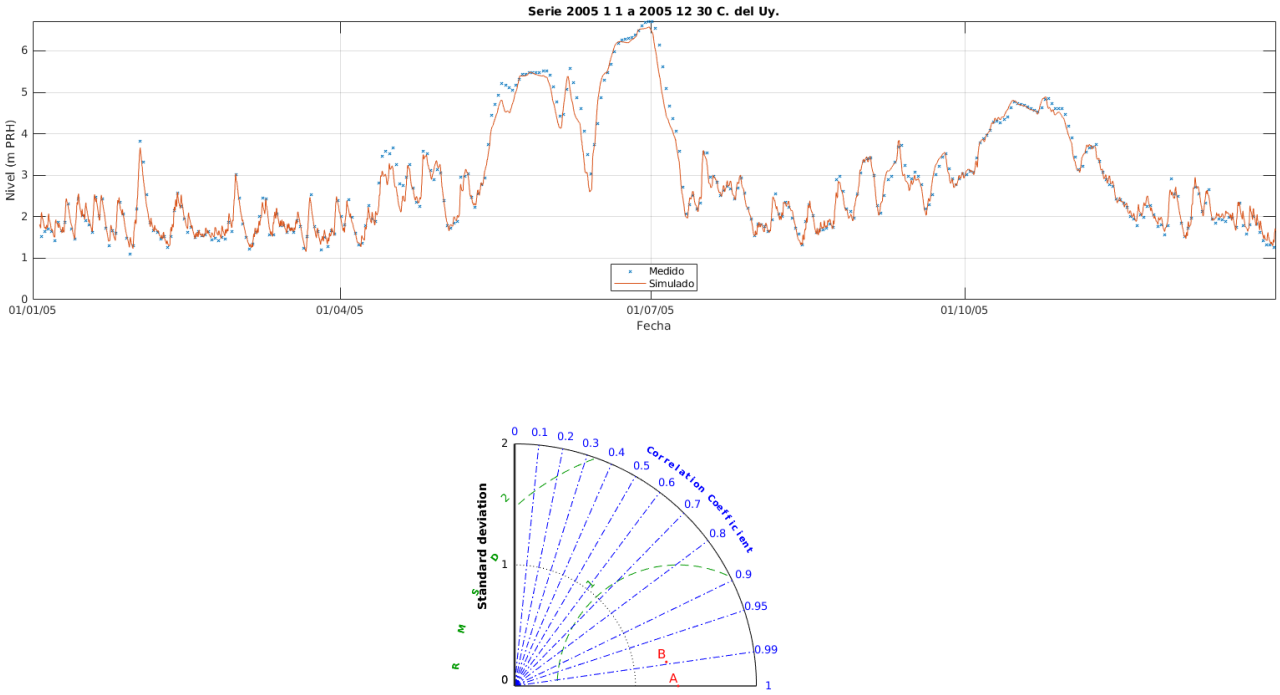


Figura 5.23: Series de niveles medidas y simuladas (arriba), diagrama de Taylor (abajo) - Concepción del Uruguay - 2005.

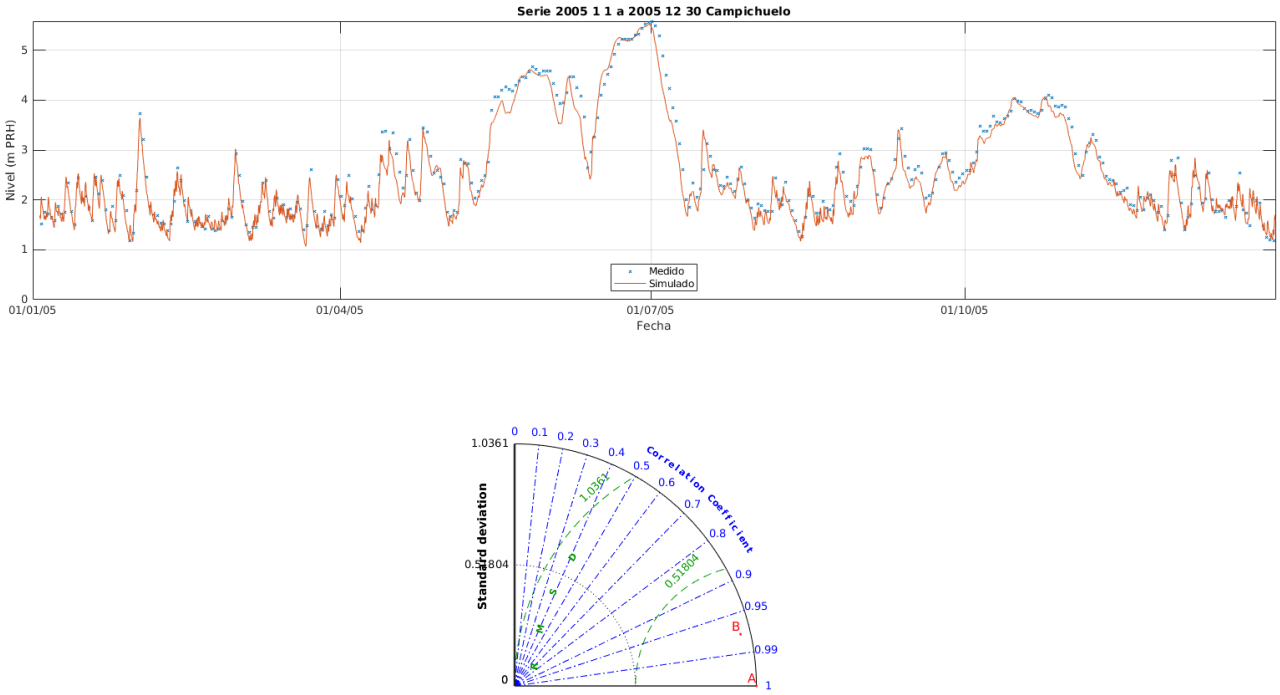


Figura 5.24: Series de niveles medidas y simuladas (arriba), diagrama de Taylor (abajo) - Campichuelo - 2005.

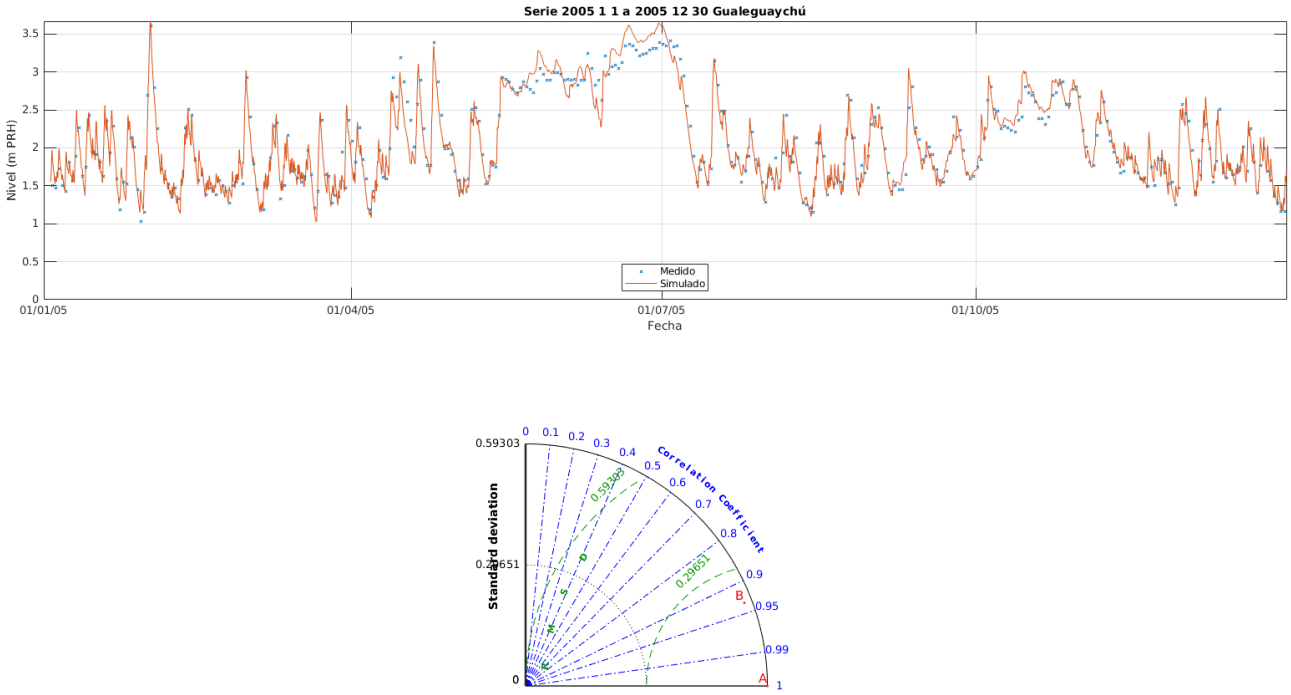


Figura 5.25: Series de niveles medidas y simuladas (arriba), diagrama de Taylor (abajo) - Gualeguaychú - 2005.

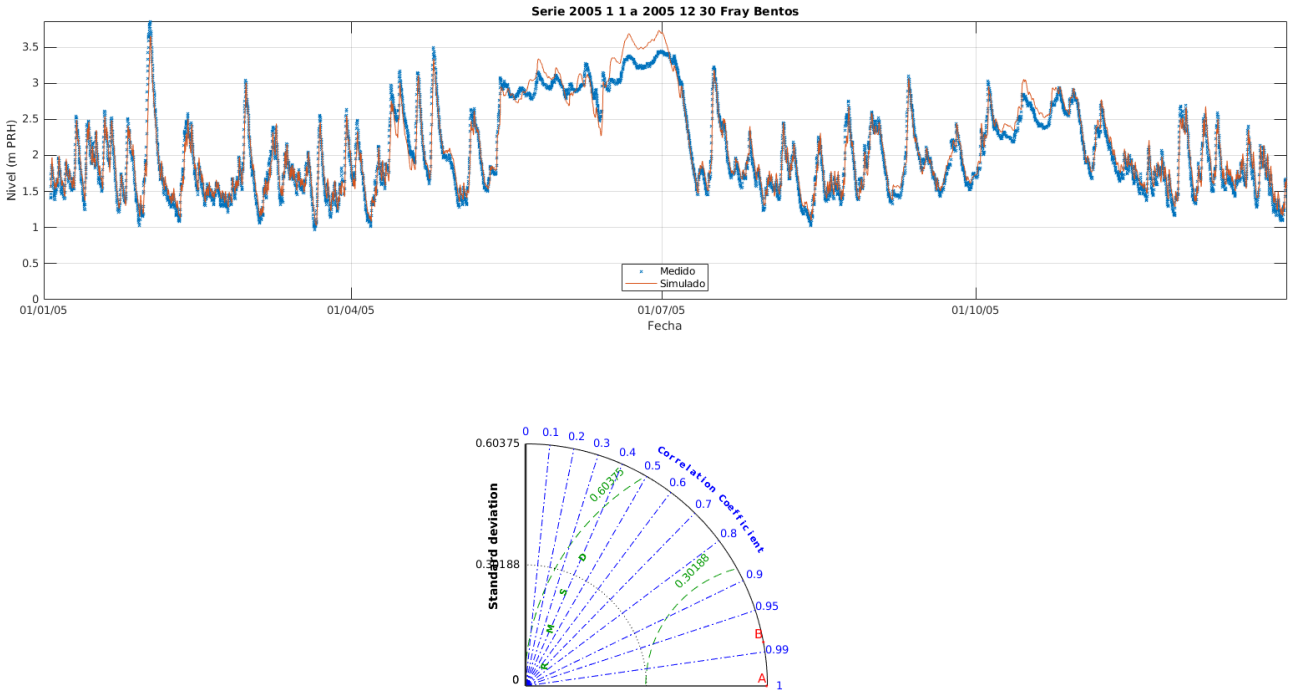


Figura 5.26: Series de niveles medidas y simuladas (arriba), diagrama de Taylor (abajo) - Fray Bentos - 2005.

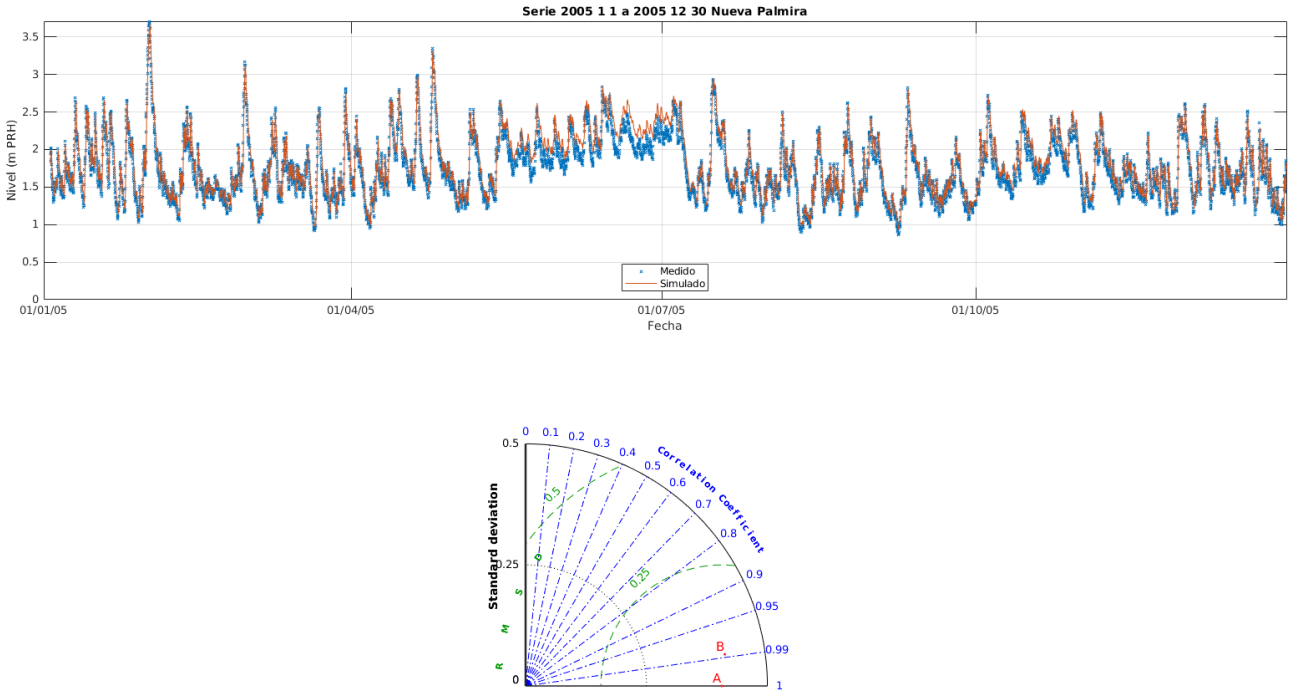


Figura 5.27: Series de niveles medidas y simuladas (arriba), diagrama de Taylor (abajo) - Nueva Palmira - 2005.

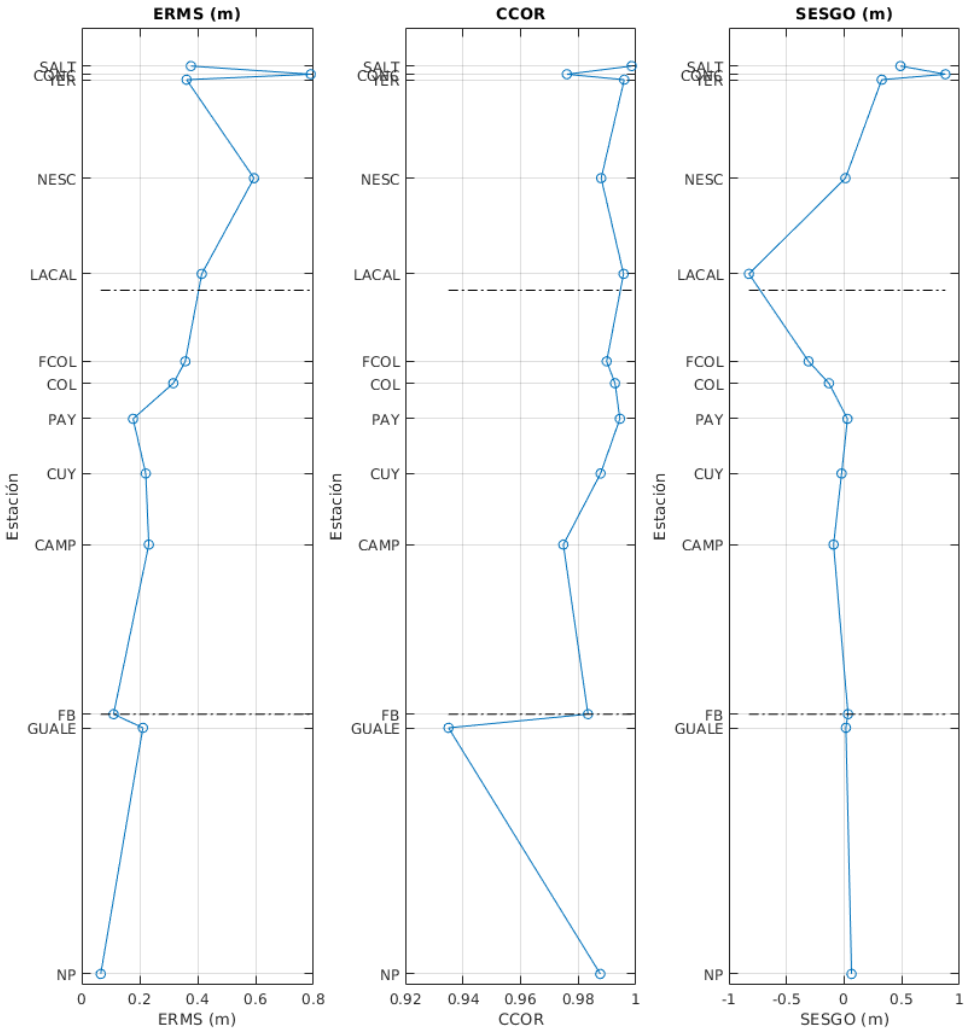


Figura 5.28: Error RMS (izquierda), coeficiente de correlación (medio), sesgo (derecha) - 2005.

Estación	ERMS	CCor	Sesgo	Media (m PRH)		STD (m)	
	(m)	-	(m)	Medida	Simulada	Medida	Simulada
Salto	0,38	0,999	0,49	6,01	6,81	3,18	2,84
Concordia	0,79	0,976	0,88	6,02	6,56	3,16	2,70
Yeruá	0,36	0,996	0,33	5,26	5,71	2,86	2,59
Nueva Escocia	0,59	0,988	0,01	4,86	4,72	2,59	2,12
La Calera	0,41	0,996	-0,83	4,55	3,70	2,19	1,82
F. Colón	0,36	0,990	-0,31	3,57	3,26	1,83	1,57
Colón	0,32	0,993	-0,13	3,32	3,20	1,77	1,52
Paysandú	0,18	0,994	0,03	3,21	3,09	1,26	1,14
C. del Uruguay	0,22	0,988	-0,02	2,90	2,86	1,35	1,27
Campichuelo	0,23	0,975	-0,09	2,62	2,51	1,04	0,99
Fray Bentos	0,11	0,983	0,03	2,08	2,11	0,60	0,60
Gualeguaychú	0,21	0,935	0,01	2,09	2,09	0,59	0,57
Nueva Palmira	0,07	0,988	0,06	1,75	1,82	0,41	0,42

Tabla 5.2: Resumen de indicadores de calidad de ajuste y parámetros estadísticos de comparación entre series medidas y simuladas para 2005.

5.3. 2006

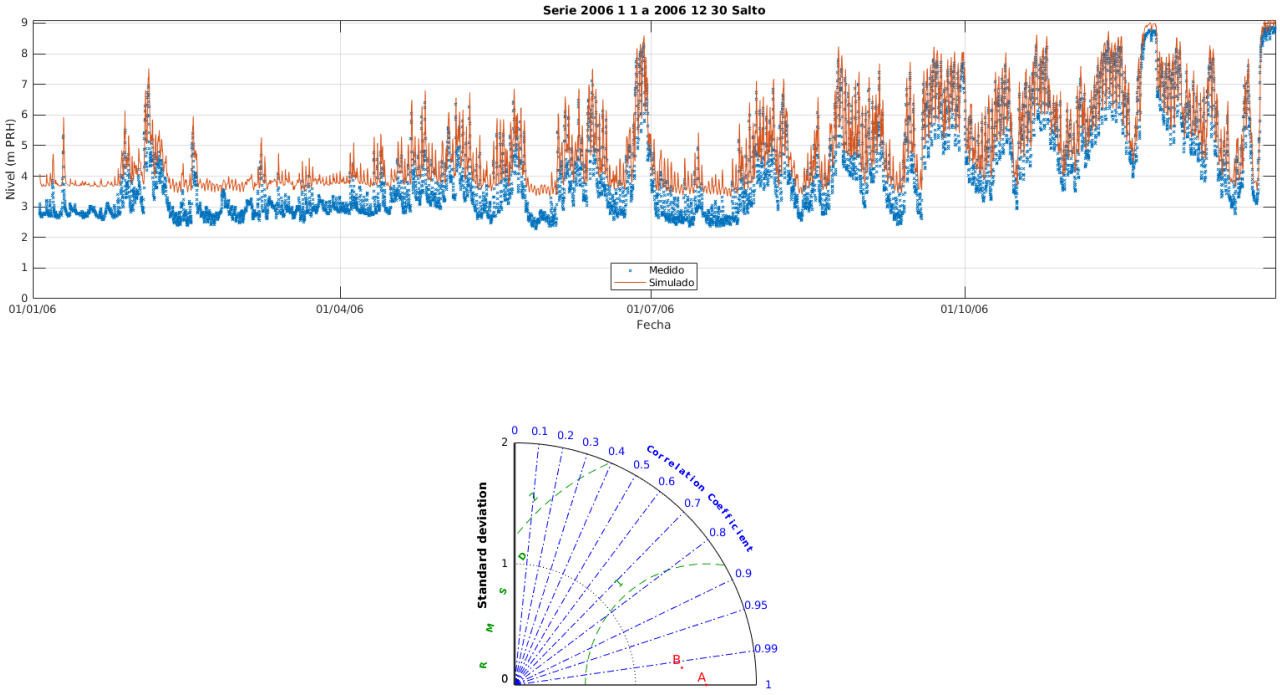


Figura 5.29: Series de niveles medidas y simuladas (arriba), diagrama de Taylor (abajo) - Salto - 2006.

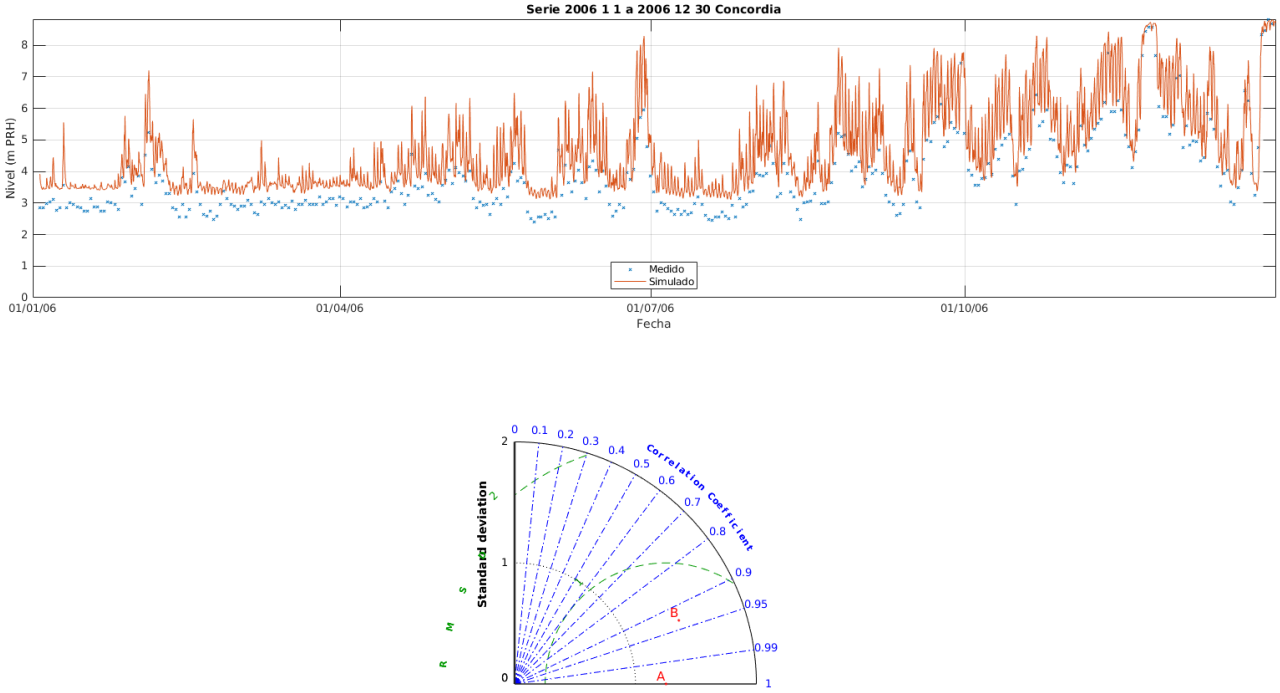


Figura 5.30: Series de niveles medidas y simuladas (arriba), diagrama de Taylor (abajo) - Concordia - 2006.

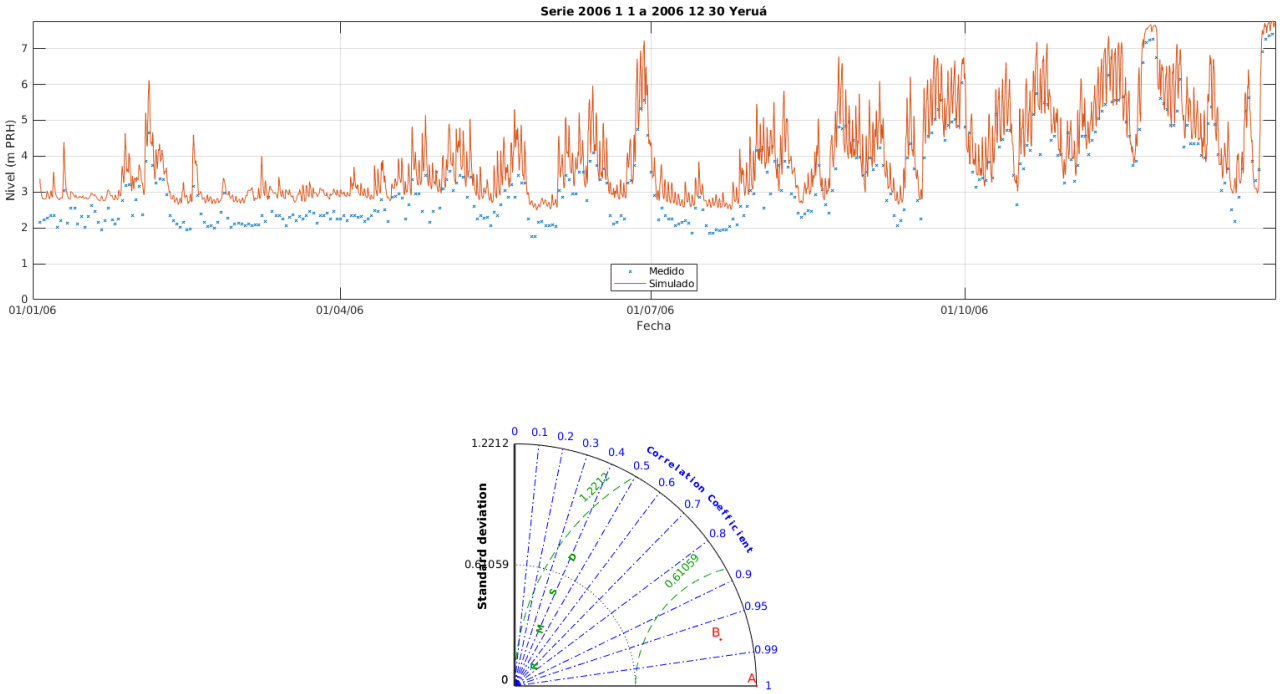


Figura 5.31: Series de niveles medidas y simuladas (arriba), diagrama de Taylor (abajo) - Yerúa - 2006.

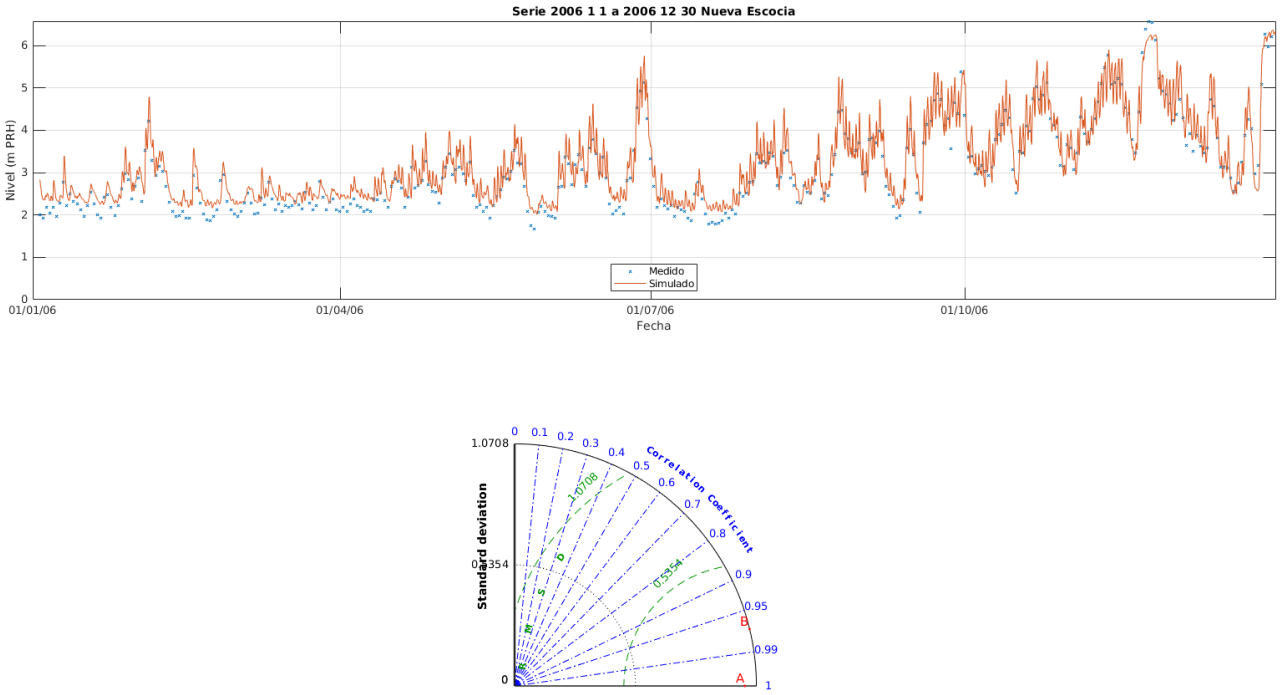


Figura 5.32: Series de niveles medidas y simuladas (arriba), diagrama de Taylor (abajo) - Nueva Escocia - 2006.

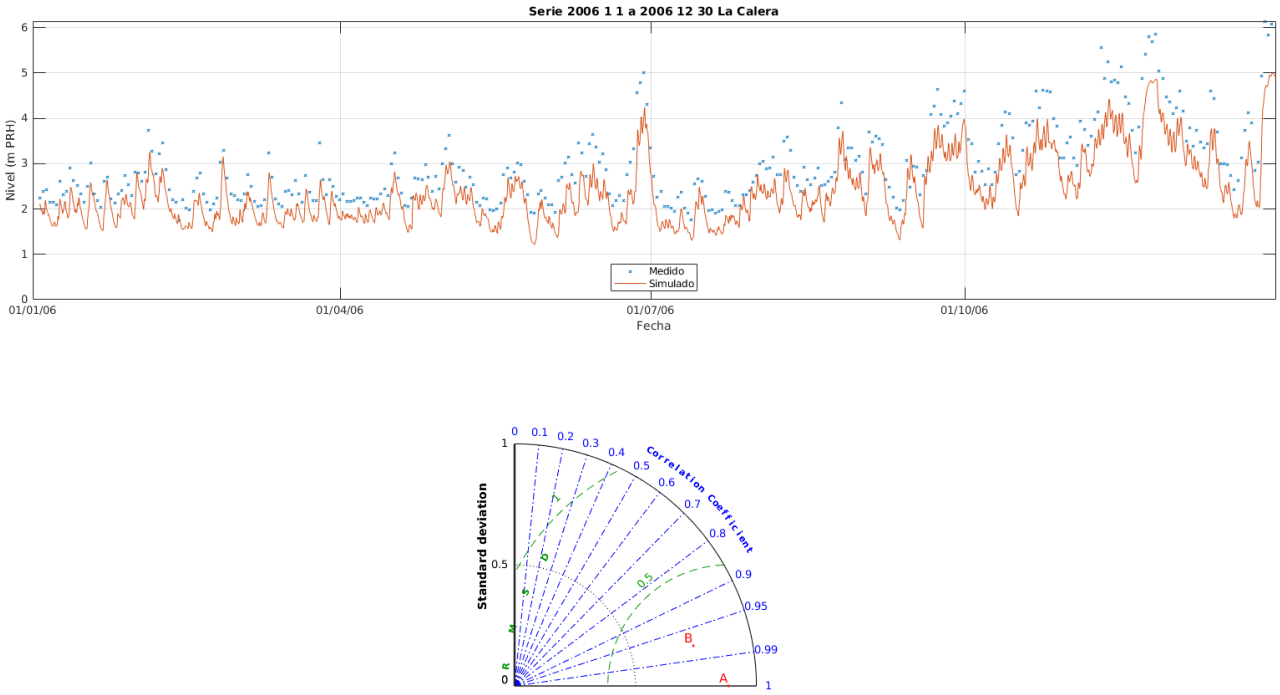


Figura 5.33: Series de niveles medidas y simuladas (arriba), diagrama de Taylor (abajo) - La Calera - 2006.

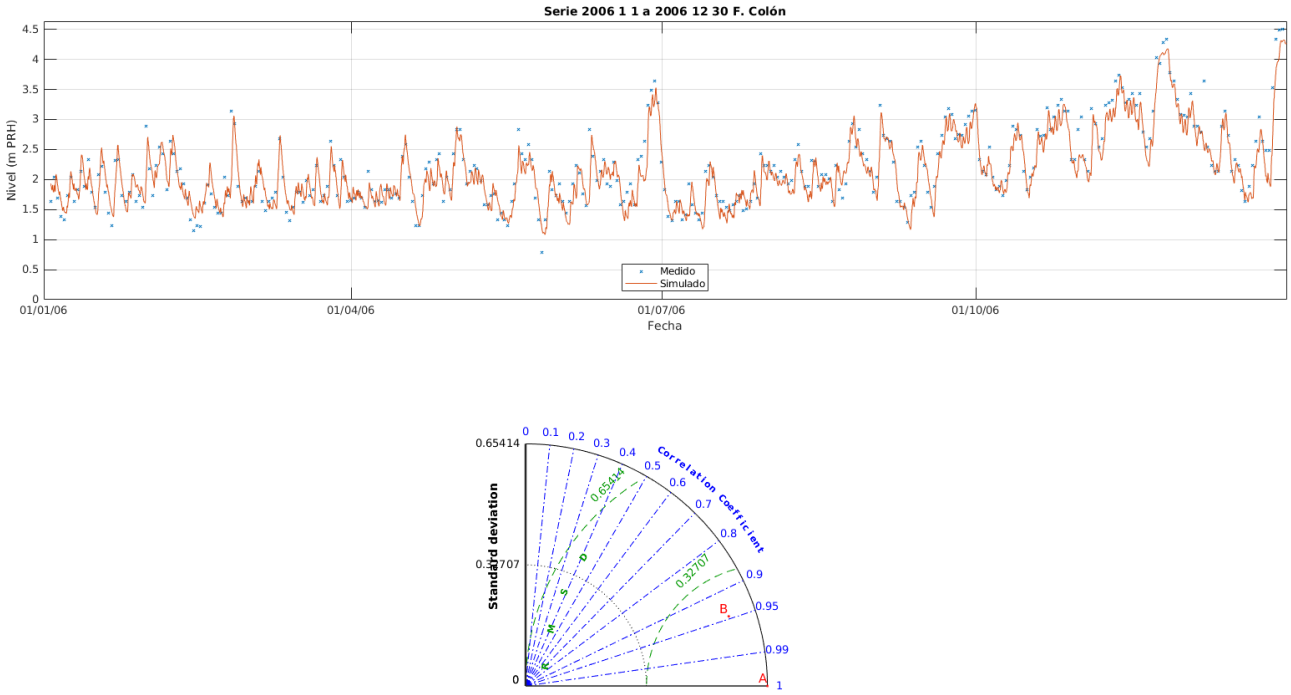


Figura 5.34: Series de niveles medidas y simuladas (arriba), diagrama de Taylor (abajo) - Fábrica Colón - 2006.

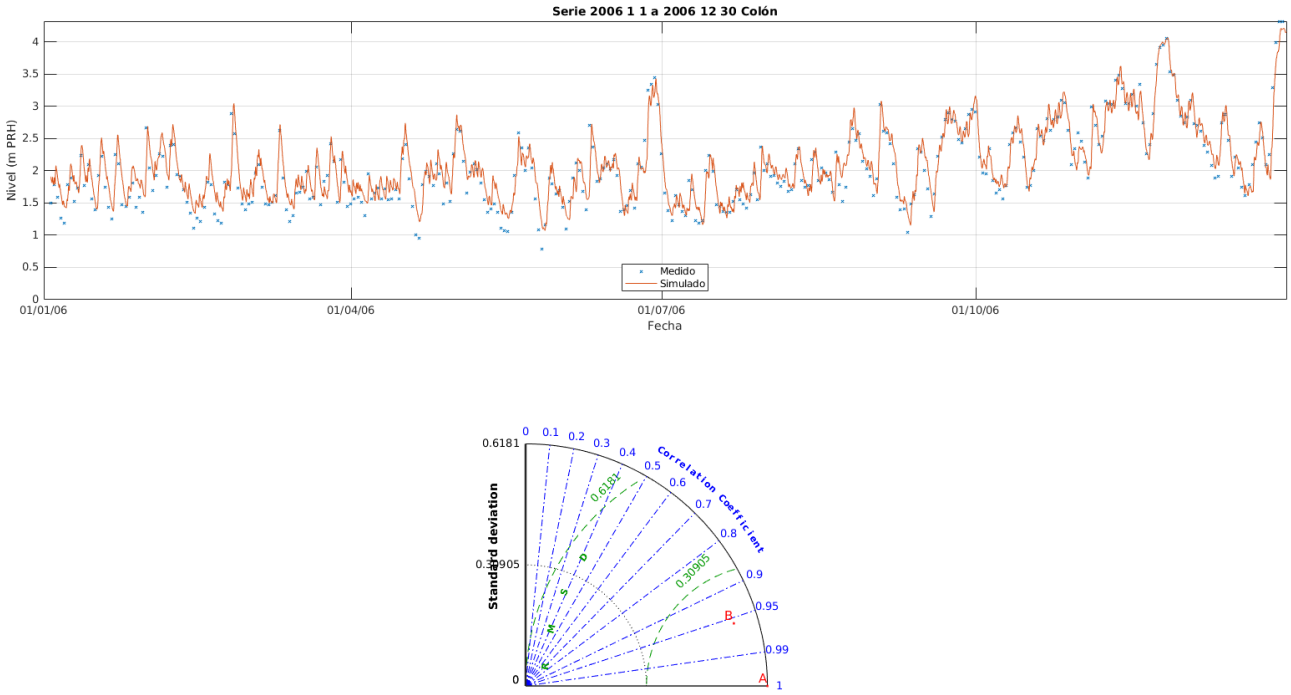


Figura 5.35: Series de niveles medidas y simuladas (arriba), diagrama de Taylor (abajo) - Colón - 2006.

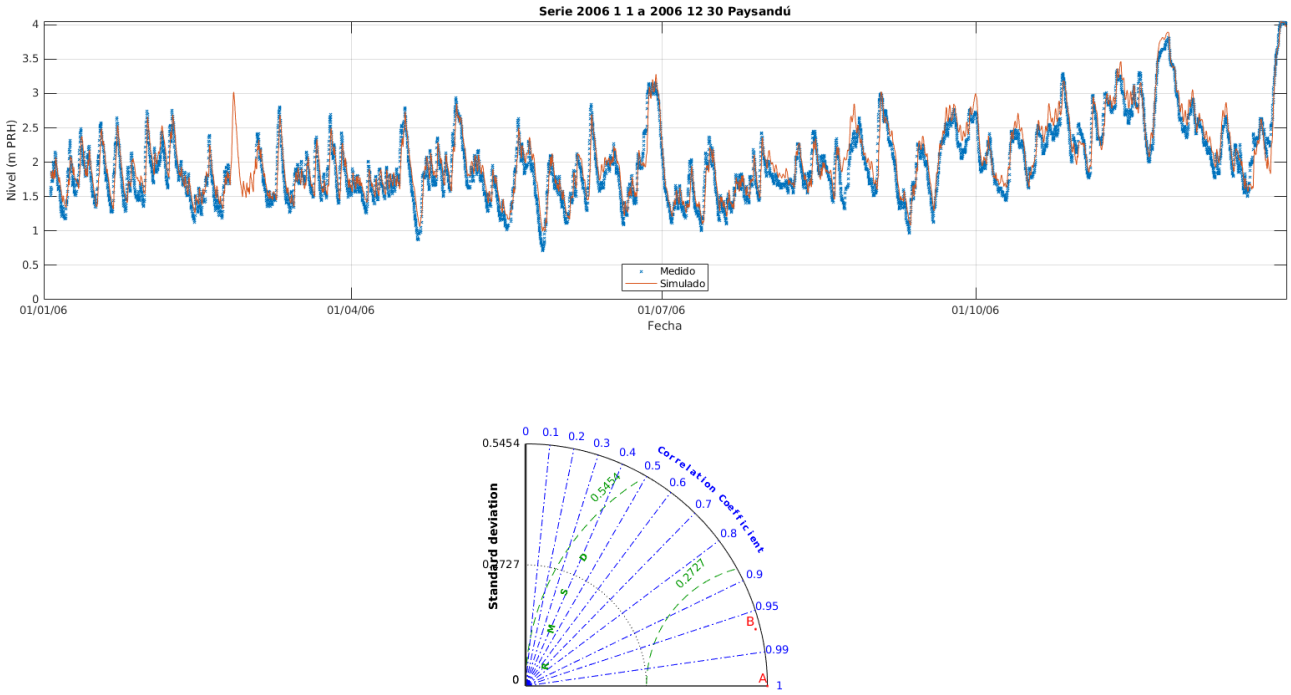


Figura 5.36: Series de niveles medidas y simuladas (arriba), diagrama de Taylor (abajo) - Paysandú - 2006.

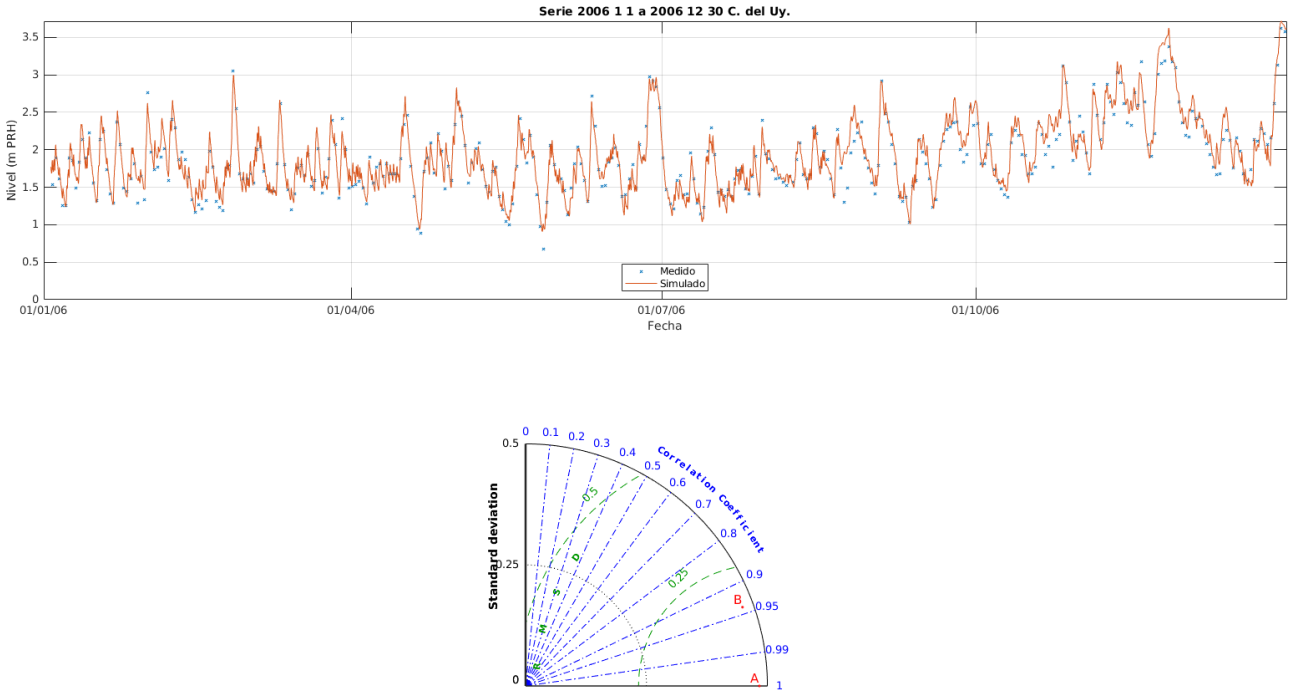


Figura 5.37: Series de niveles medidas y simuladas (arriba), diagrama de Taylor (abajo) - Concepción del Uruguay - 2006.

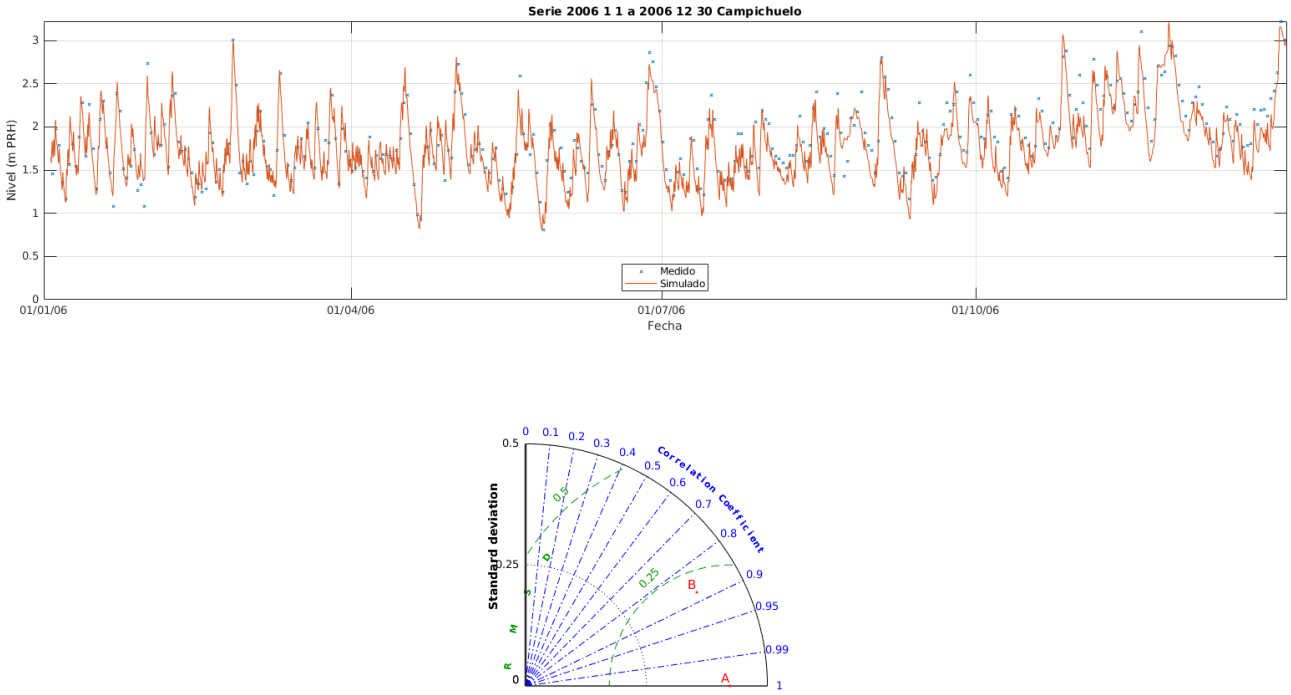


Figura 5.38: Series de niveles medidas y simuladas (arriba), diagrama de Taylor (abajo) - Campichuelo - 2006.

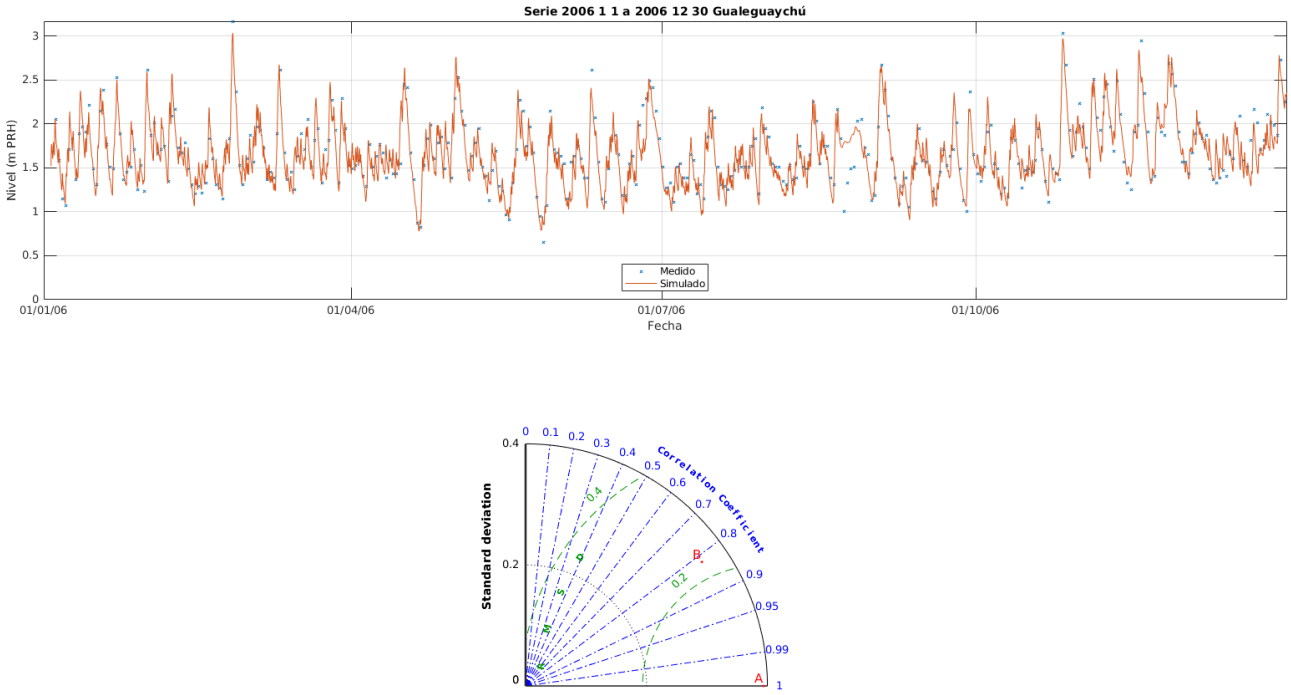


Figura 5.39: Series de niveles medidas y simuladas (arriba), diagrama de Taylor (abajo) - Gualeguaychú - 2006.

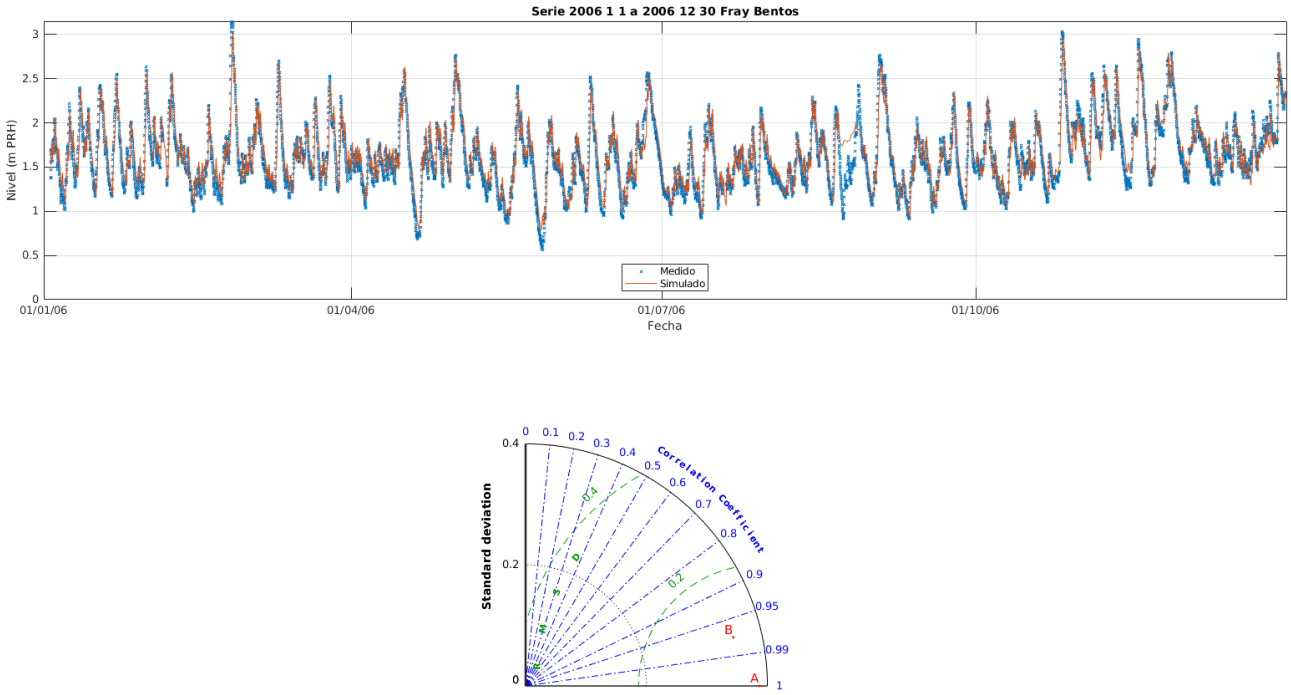


Figura 5.40: Series de niveles medidas y simuladas (arriba), diagrama de Taylor (abajo) - Fray Bentos - 2006.

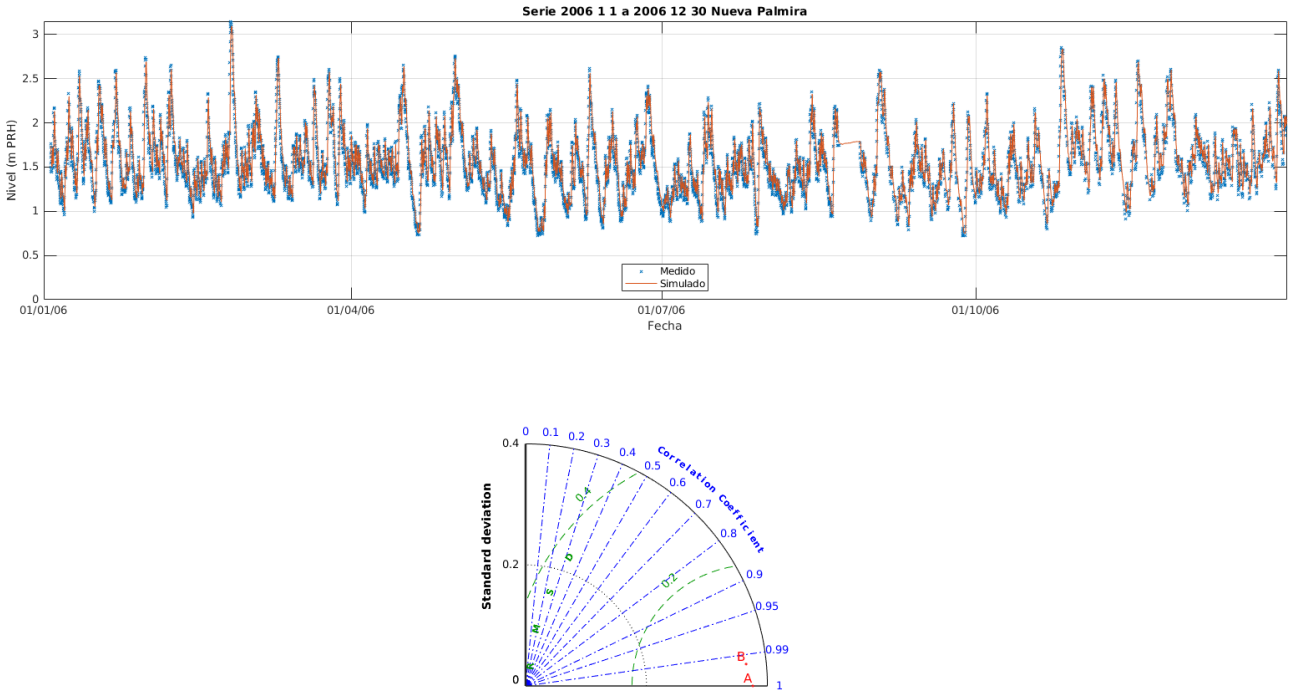


Figura 5.41: Series de niveles medidas y simuladas (arriba), diagrama de Taylor (abajo) - Nueva Palmira - 2006.

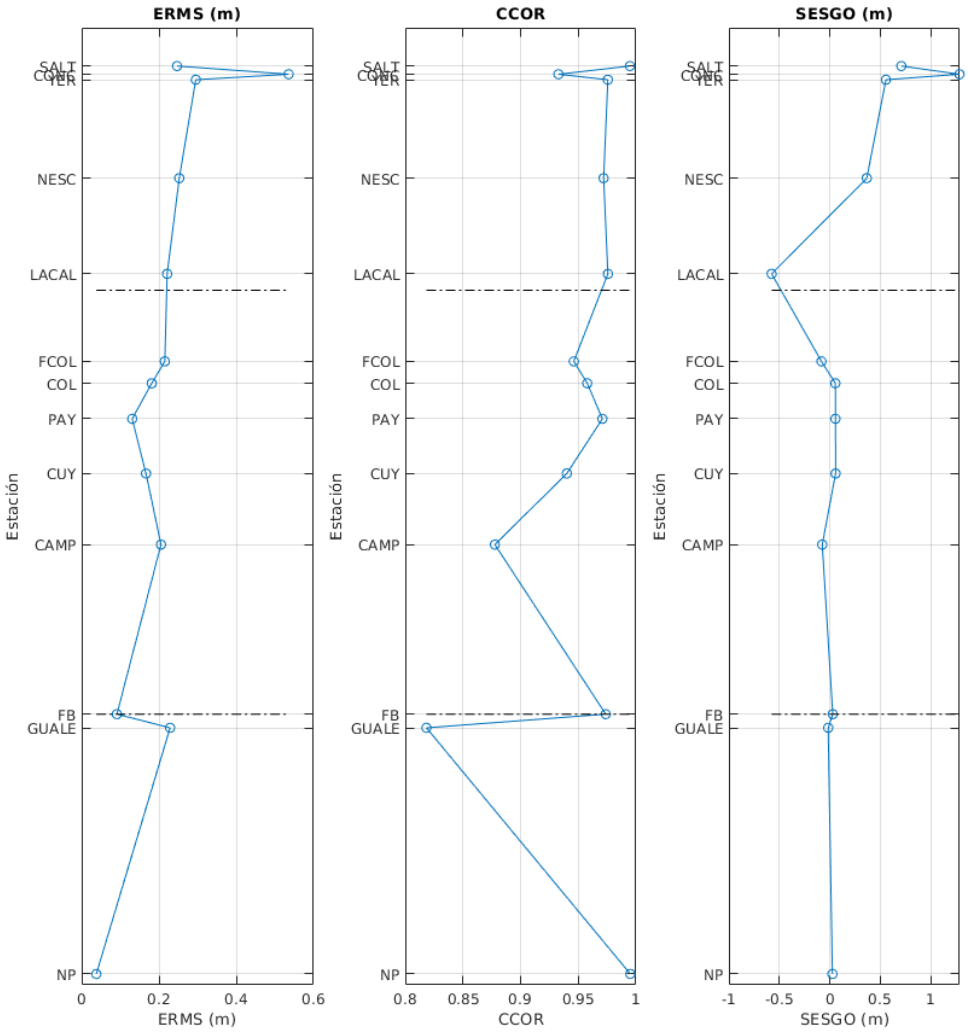


Figura 5.42: Error RMS (izquierda), coeficiente de correlación (medio), sesgo (derecha) - 2006.

Estación	ERMS	CCor	Sesgo	Media (m PRH)		STD (m)	
	(m)	-	(m)	Medida	Simulada	Medida	Simulada
Salto	0,25	0,995	0,71	4,19	4,90	1,59	1,39
Concordia	0,54	0,933	1,28	3,84	4,67	1,25	1,46
Yeruá	0,30	0,976	0,56	3,29	3,94	1,22	1,07
Nueva Escocia	0,25	0,972	0,37	3,06	3,24	1,02	1,07
La Calera	0,22	0,976	-0,58	2,98	2,40	0,89	0,76
F. Colón	0,22	0,946	-0,08	2,20	2,13	0,65	0,58
Colón	0,18	0,958	0,05	2,03	2,10	0,62	0,56
Paysandú	0,13	0,971	0,06	1,99	2,04	0,55	0,53
C. del Uruguay	0,17	0,940	0,06	1,89	1,93	0,48	0,48
Campichuelo	0,21	0,878	-0,08	1,87	1,78	0,42	0,40
Fray Bentos	0,09	0,974	0,03	1,63	1,66	0,39	0,35
Gualeguaychú	0,23	0,818	-0,02	1,68	1,66	0,39	0,36
Nueva Palmira	0,04	0,995	0,02	1,55	1,57	0,38	0,37

Tabla 5.3: Resumen de indicadores de calidad de ajuste y parámetros estadísticos de comparación entre series medidas y simuladas para 2006.

5.4. 2007

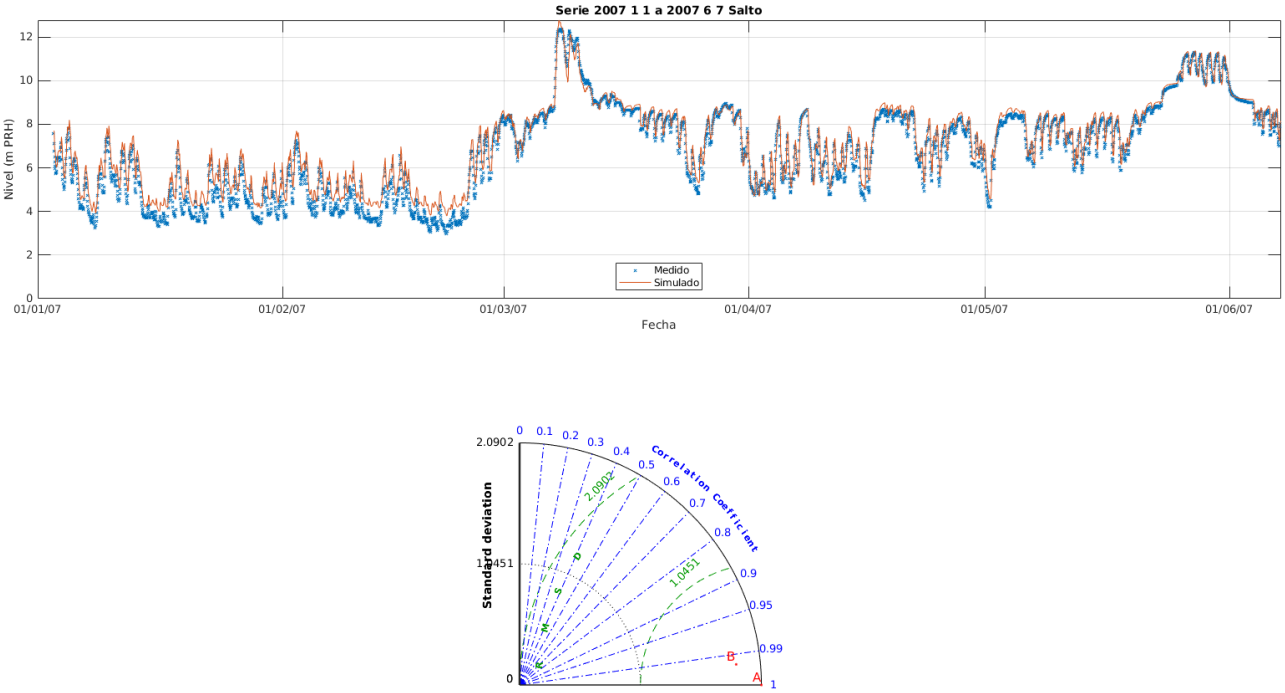


Figura 5.43: Series de niveles medidas y simuladas (arriba), diagrama de Taylor (abajo) - Salto - 2007.

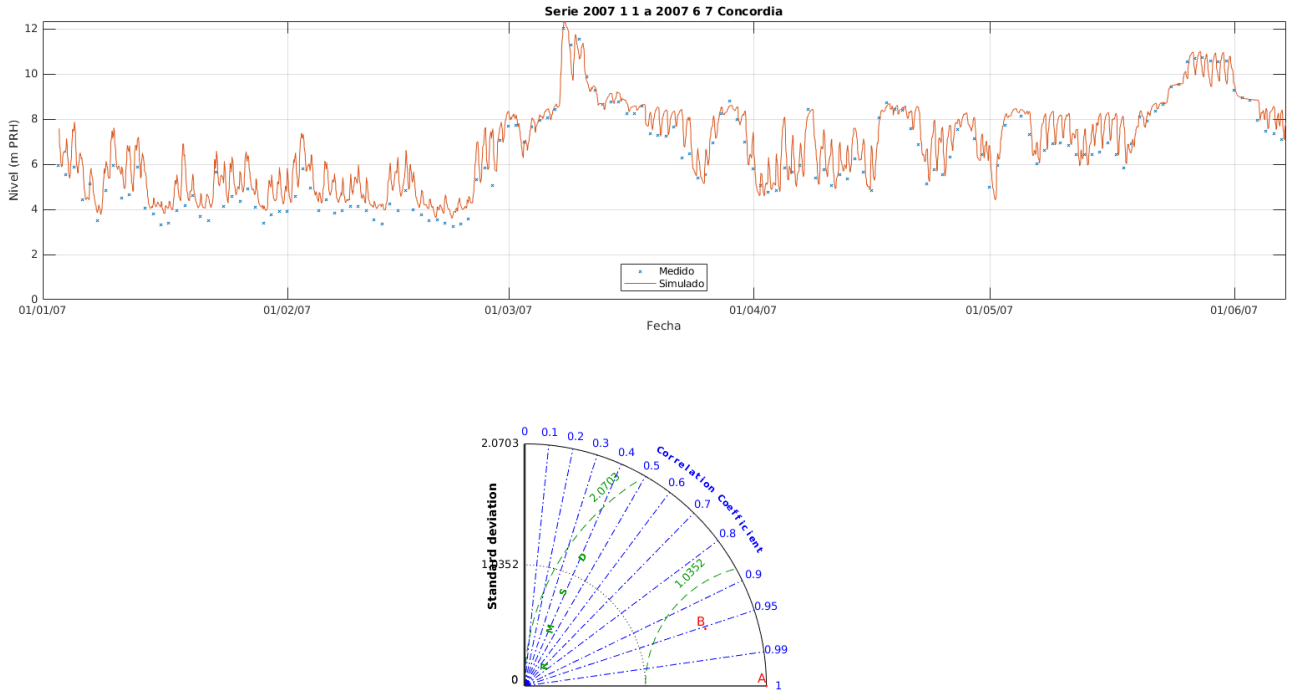


Figura 5.44: Series de niveles medidas y simuladas (arriba), diagrama de Taylor (abajo) - Concordia - 2007.

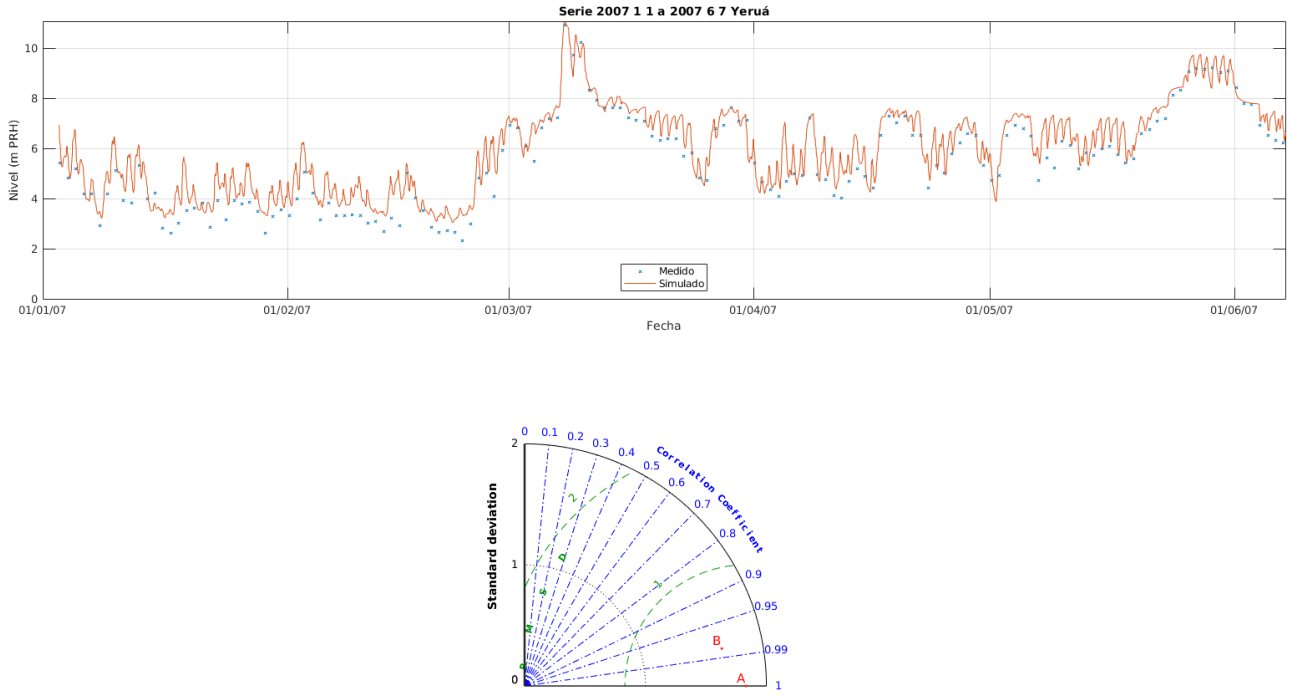


Figura 5.45: Series de niveles medidas y simuladas (arriba), diagrama de Taylor (abajo) - Yerúa - 2007.

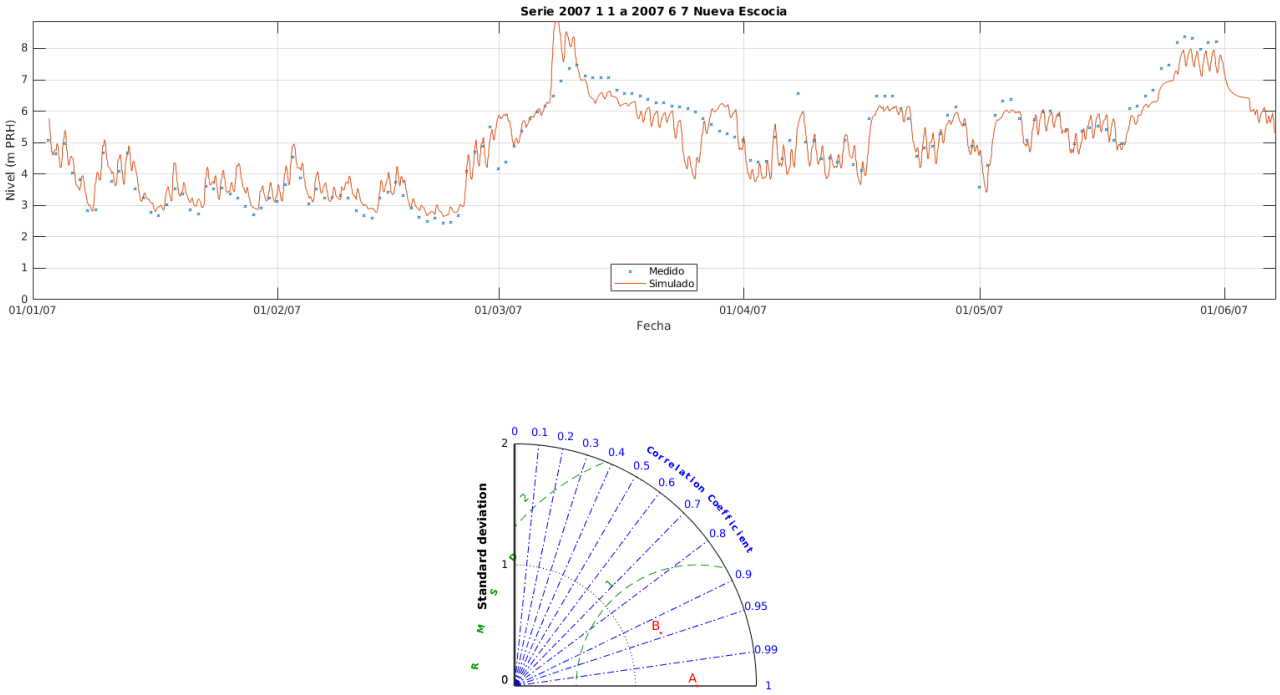


Figura 5.46: Series de niveles medidas y simuladas (arriba), diagrama de Taylor (abajo) - Nueva Escocia - 2007.

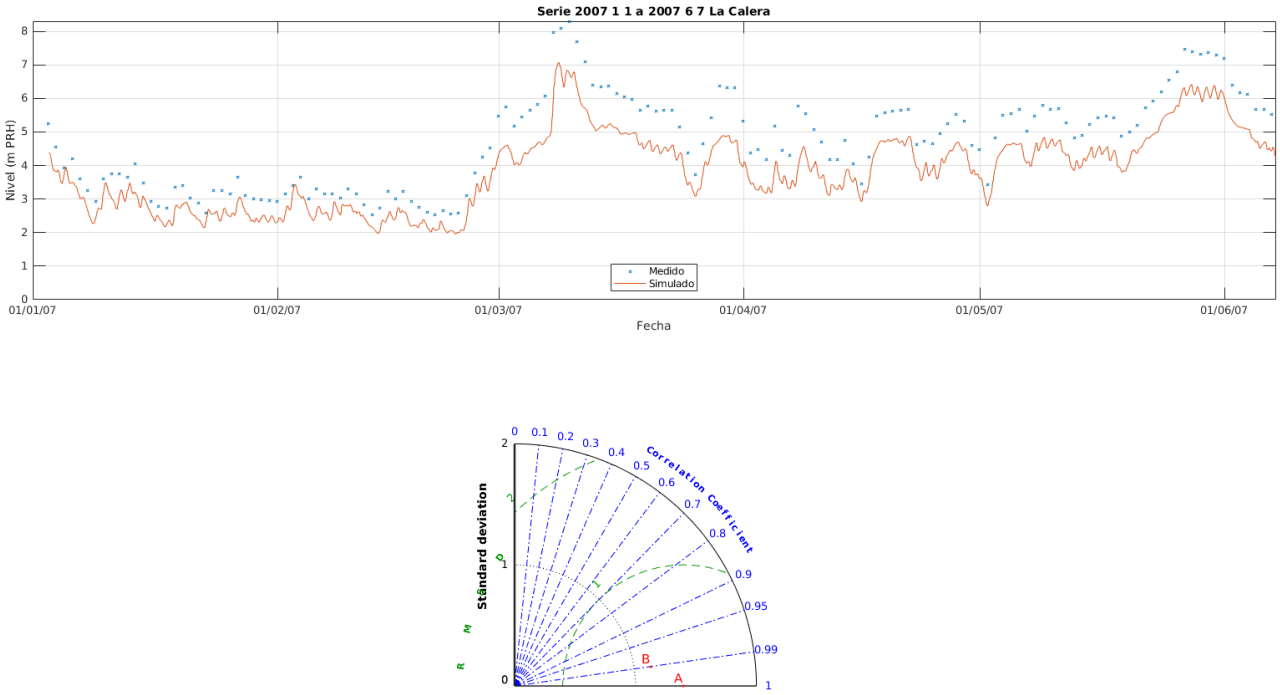


Figura 5.47: Series de niveles medidas y simuladas (arriba), diagrama de Taylor (abajo) - La Calera - 2007.

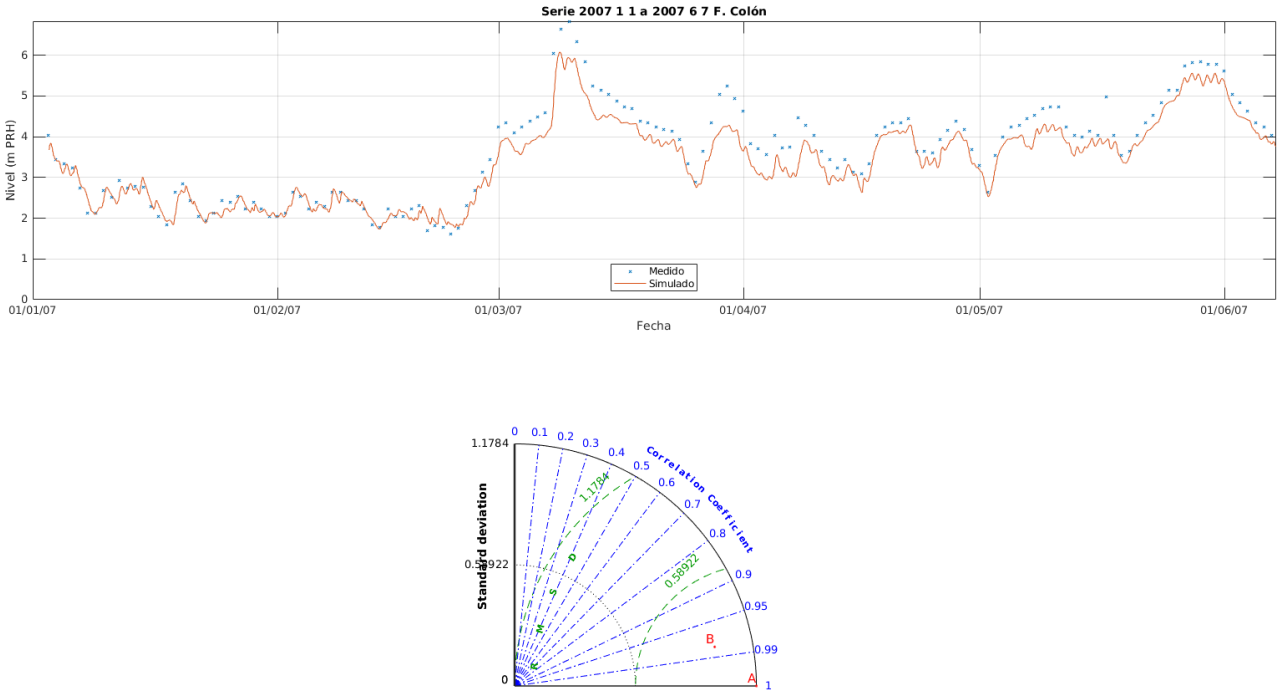


Figura 5.48: Series de niveles medidas y simuladas (arriba), diagrama de Taylor (abajo) - Fábrica Colón - 2007.

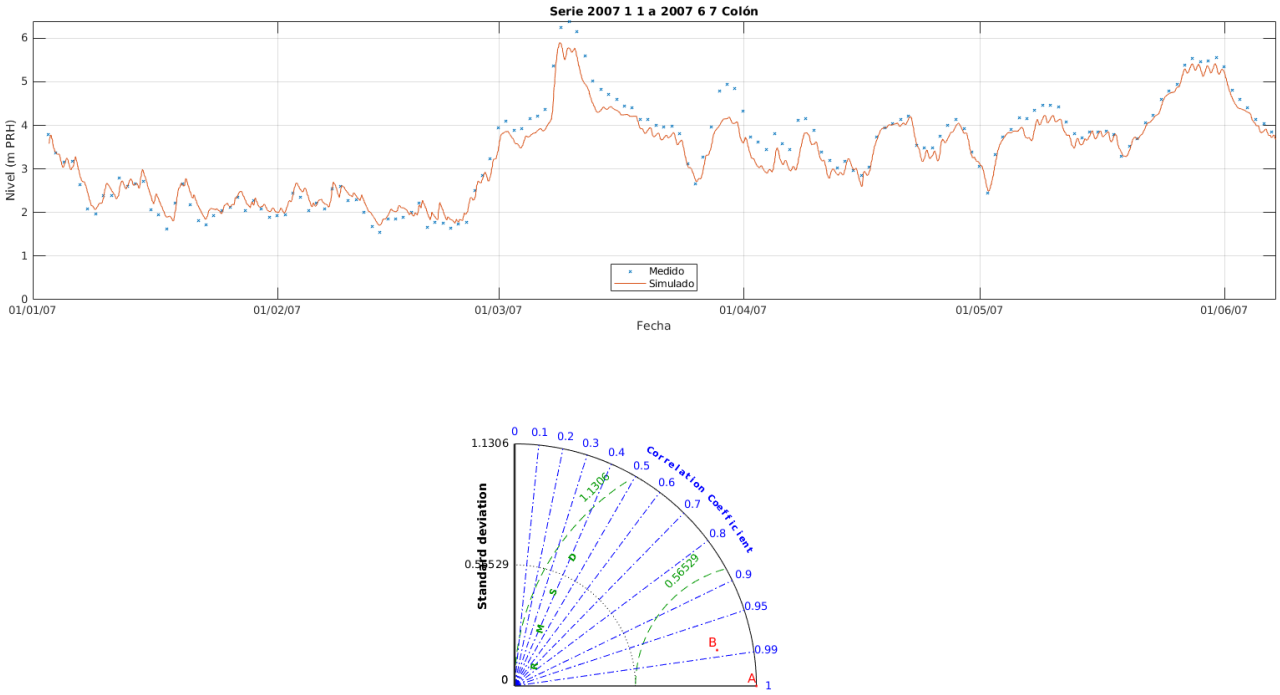


Figura 5.49: Series de niveles medidas y simuladas (arriba), diagrama de Taylor (abajo) - Colón - 2007.

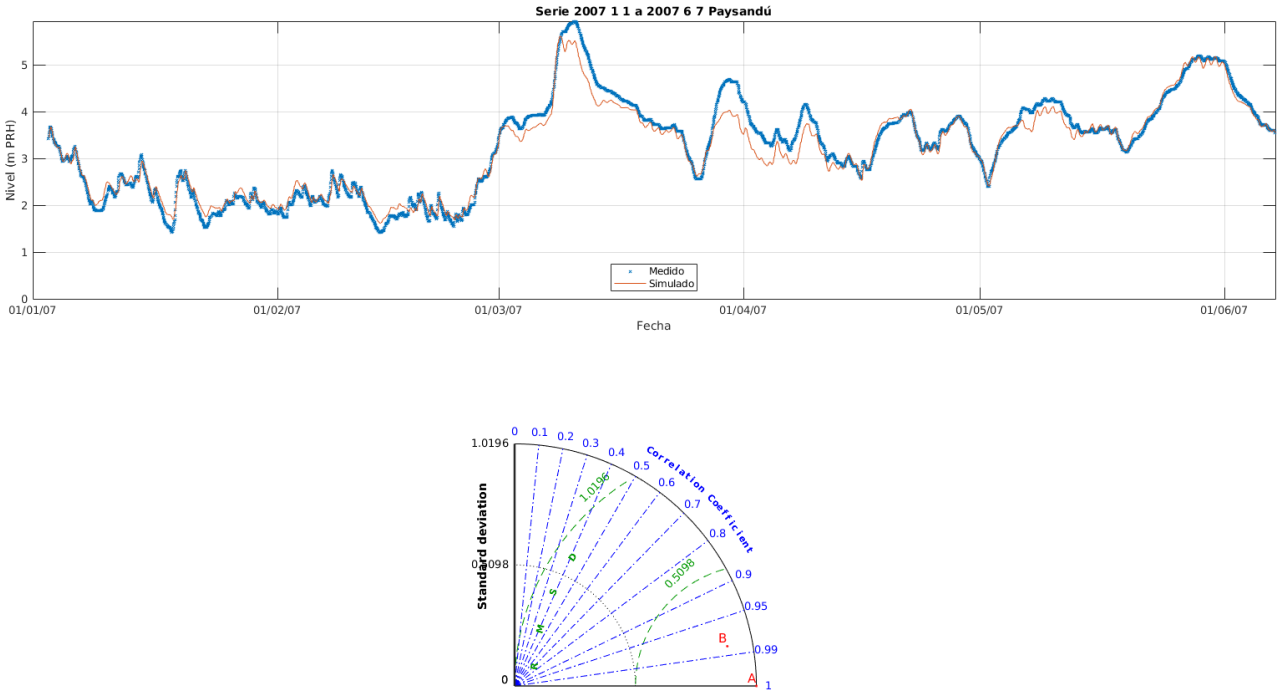


Figura 5.50: Series de niveles medidas y simuladas (arriba), diagrama de Taylor (abajo) - Paysandú - 2007.

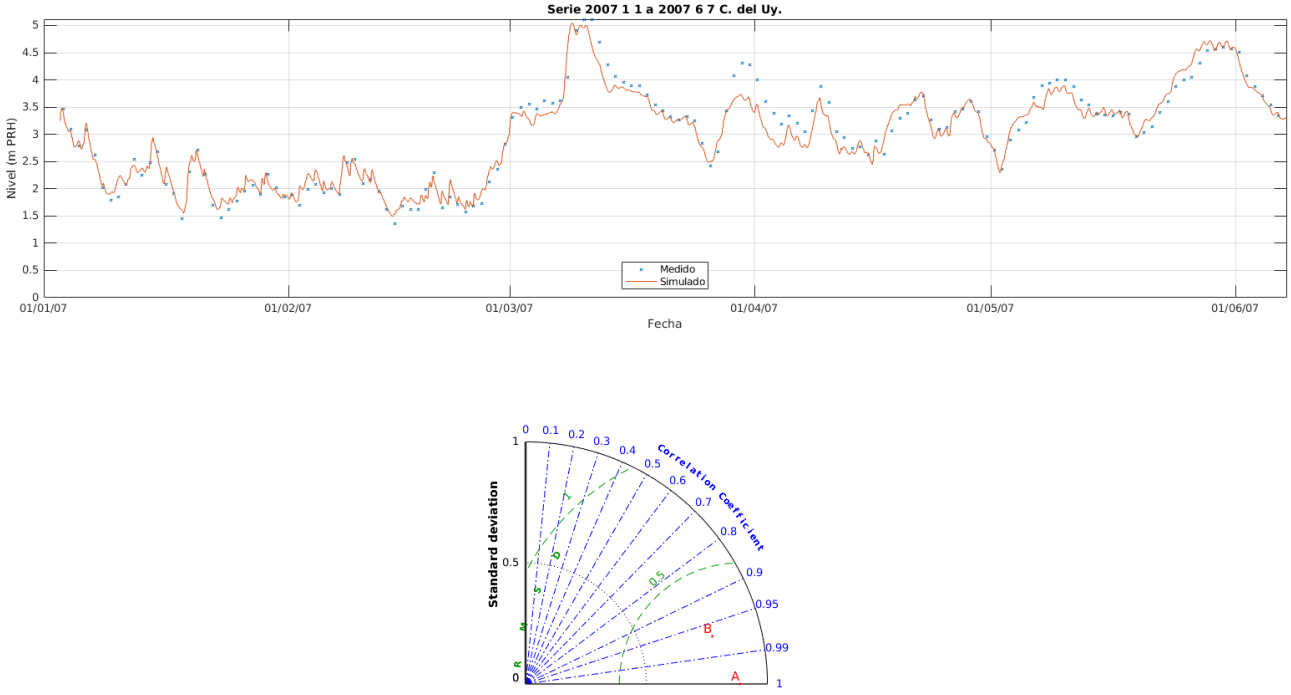


Figura 5.51: Series de niveles medidas y simuladas (arriba), diagrama de Taylor (abajo) - Concepción del Uruguay - 2007.

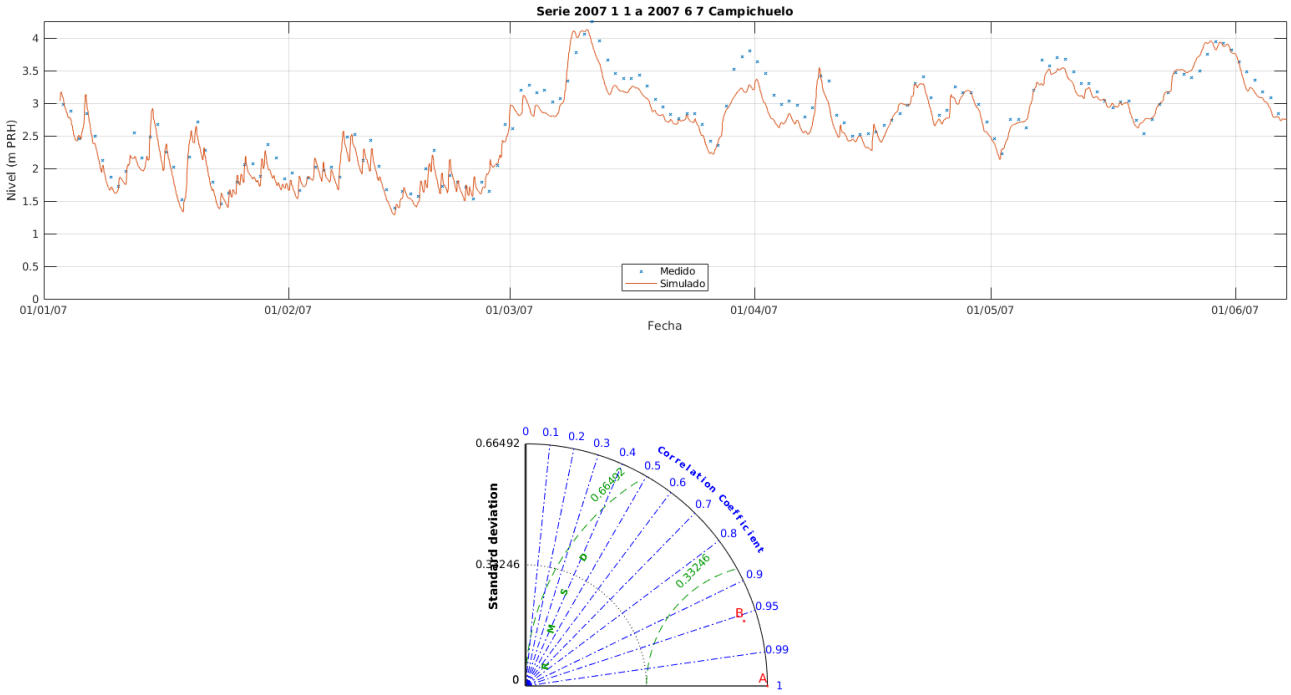


Figura 5.52: Series de niveles medidas y simuladas (arriba), diagrama de Taylor (abajo) - Campichuelo - 2007.

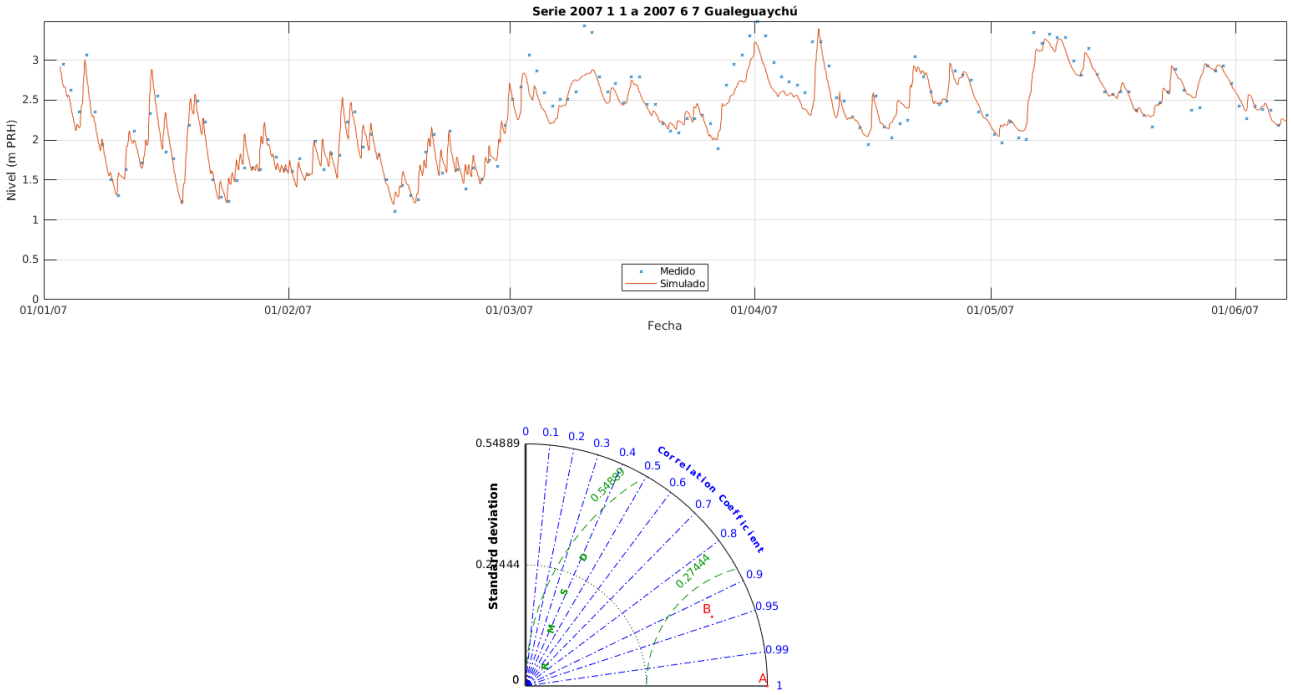


Figura 5.53: Series de niveles medidas y simuladas (arriba), diagrama de Taylor (abajo) - Gualeguaychú - 2007.

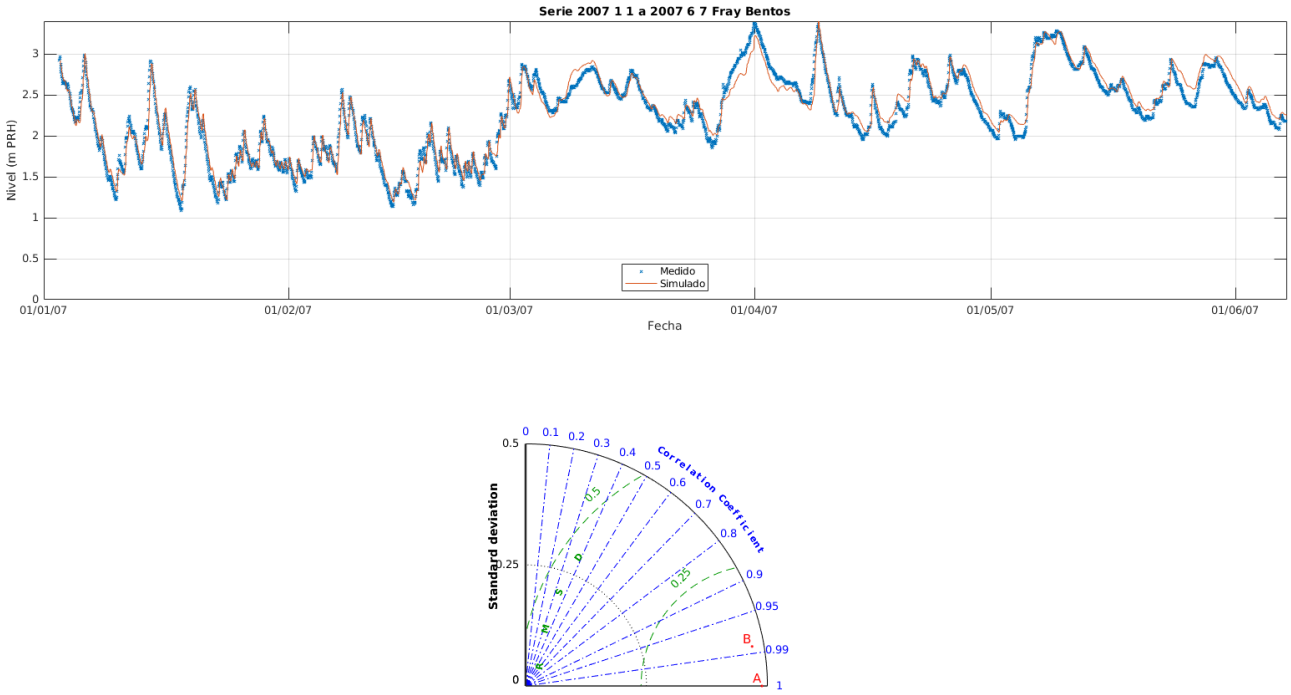


Figura 5.54: Series de niveles medidas y simuladas (arriba), diagrama de Taylor (abajo) - Fray Bentos - 2007.

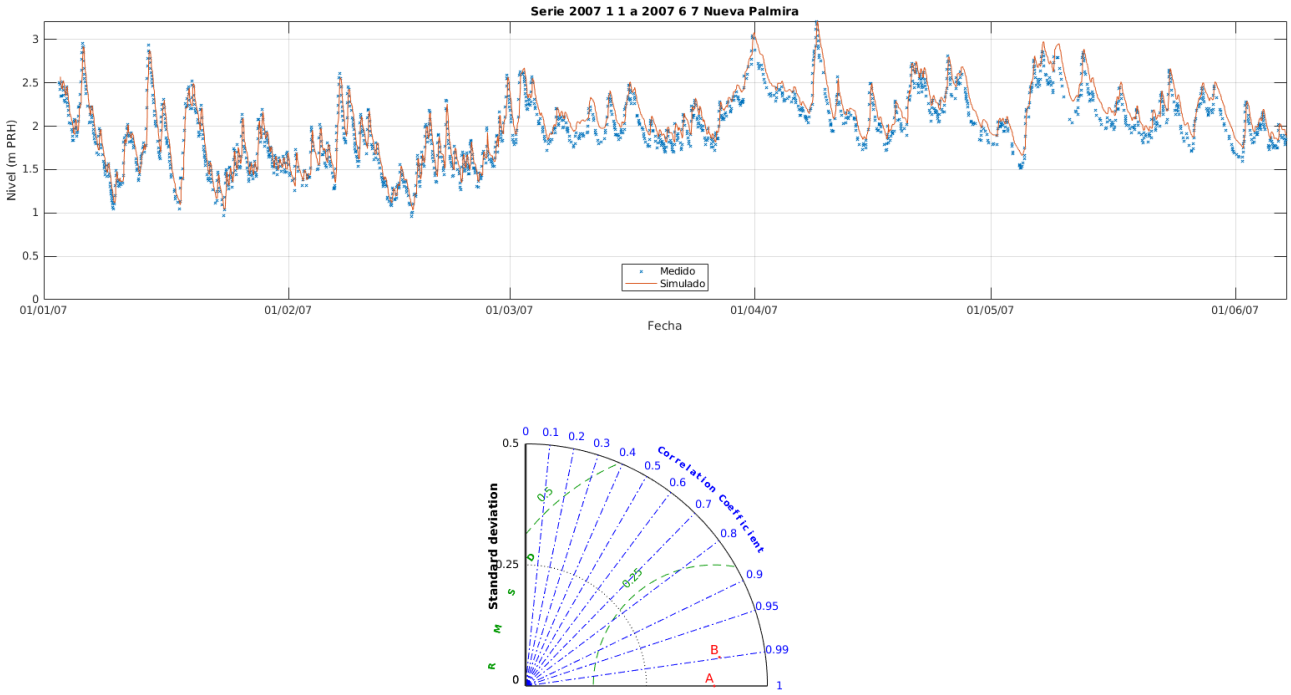


Figura 5.55: Series de niveles medidas y simuladas (arriba), diagrama de Taylor (abajo) - Nueva Palmira - 2007.

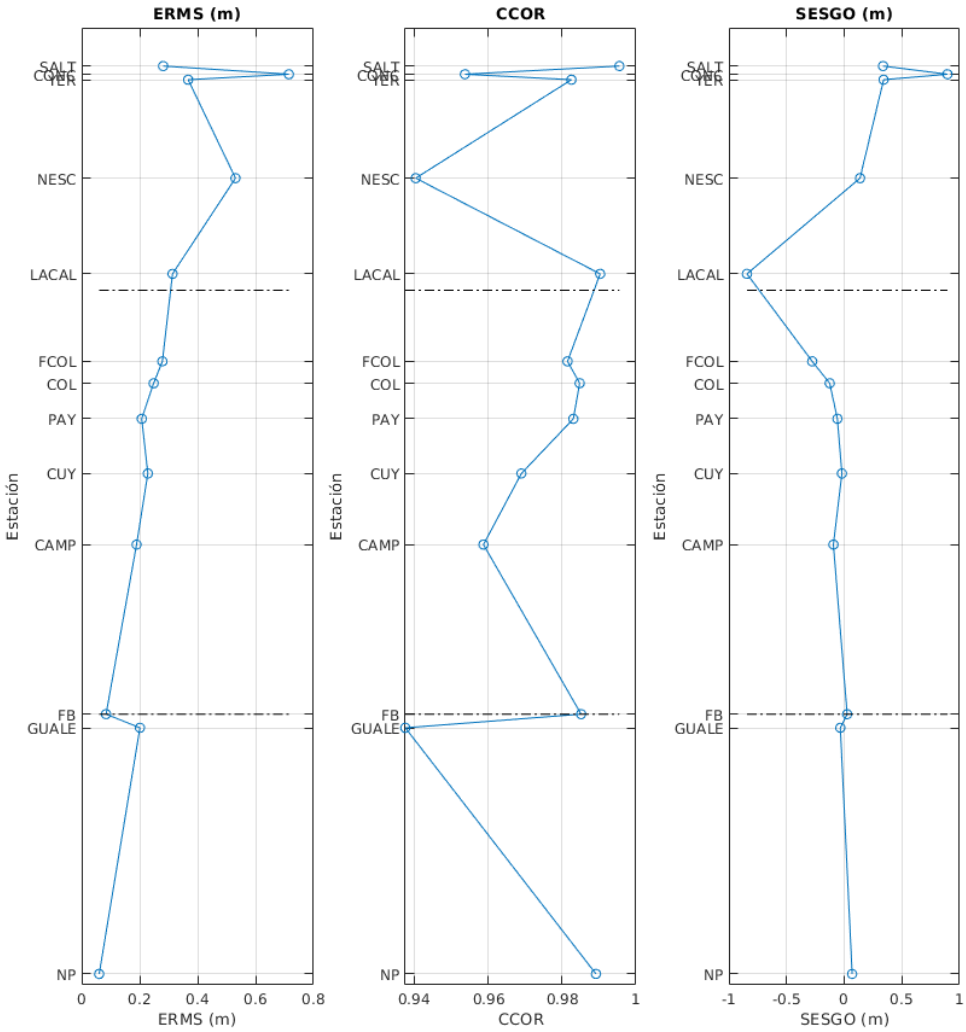


Figura 5.56: Error RMS (izquierda), coeficiente de correlación (medio), sesgo (derecha) - 2007.

Estación	ERMS	CCor	Sesgo	Media (m PRH)		STD (m)	
	(m)	-	(m)	Medida	Simulada	Medida	Simulada
Salto	0,28	0,996	0,34	6,78	7,12	2,09	1,88
Concordia	0,71	0,954	0,90	6,33	6,88	2,07	1,62
Yeruá	0,37	0,983	0,34	5,51	6,01	1,83	1,66
Nueva Escocia	0,53	0,940	0,14	4,93	4,96	1,51	1,29
La Calera	0,31	0,990	-0,84	4,73	3,86	1,40	1,14
F. Colón	0,28	0,982	-0,28	3,66	3,38	1,18	0,99
Colón	0,25	0,985	-0,13	3,44	3,32	1,13	0,96
Paysandú	0,21	0,983	-0,06	3,27	3,21	1,02	0,91
C. del Uruguay	0,23	0,969	-0,02	3,02	2,99	0,89	0,80
Campichuelo	0,19	0,959	-0,09	2,75	2,64	0,66	0,63
Fray Bentos	0,08	0,985	0,03	2,28	2,30	0,49	0,48
Gualeguaychú	0,20	0,938	-0,03	2,33	2,29	0,55	0,45
Nueva Palmira	0,06	0,989	0,07	1,98	2,06	0,39	0,41

Tabla 5.4: Resumen de indicadores de calidad de ajuste y parámetros estadísticos de comparación entre series medidas y simuladas para 2007.

5.5. 2008

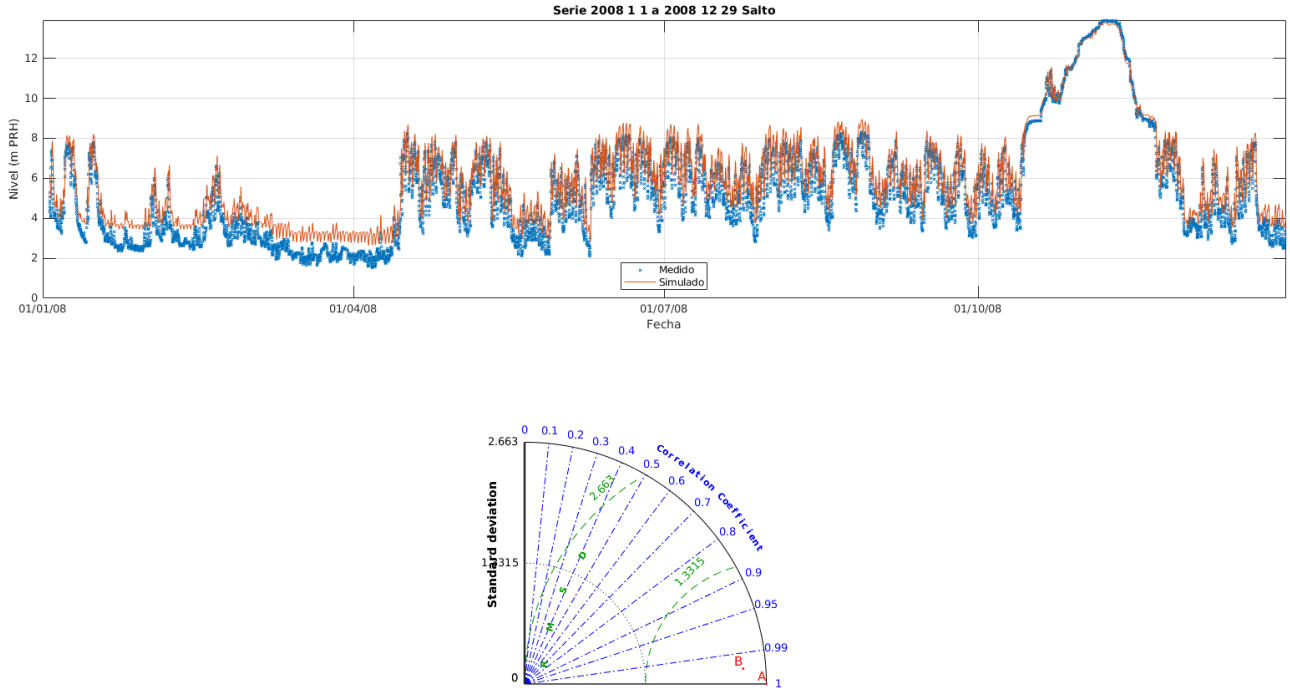


Figura 5.57: Series de niveles medidas y simuladas (arriba), diagrama de Taylor (abajo) - Salto - 2008.

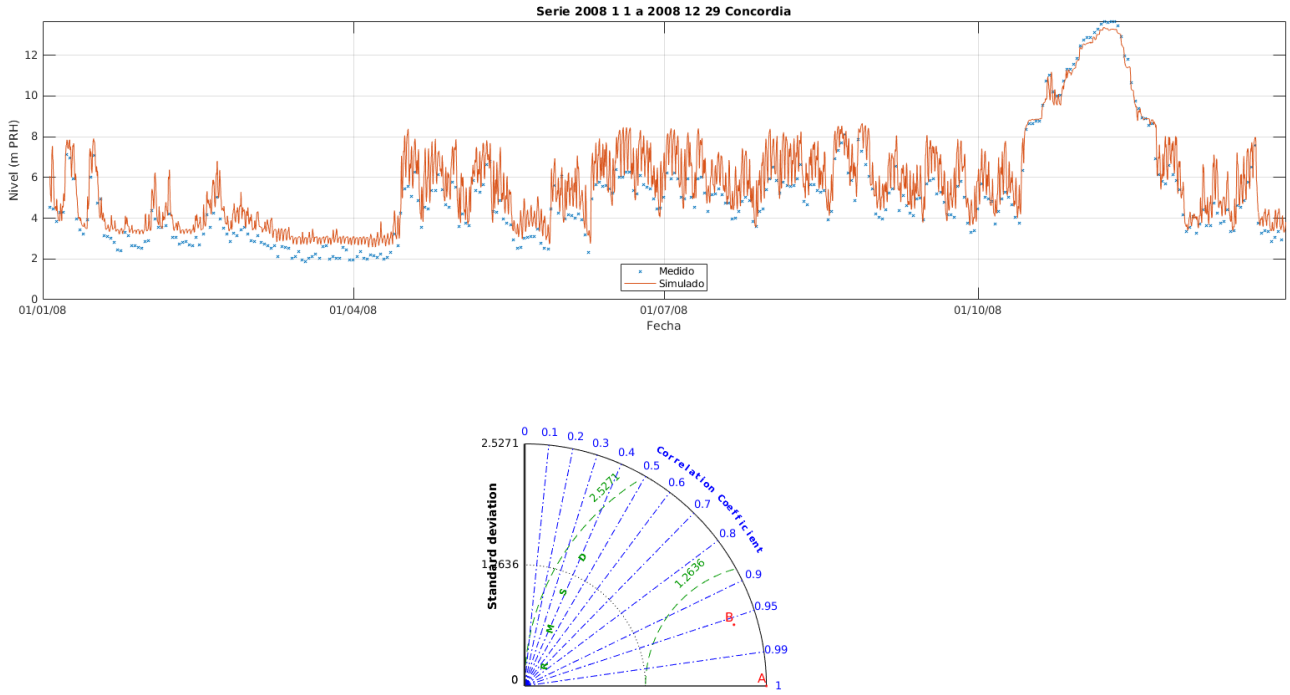


Figura 5.58: Series de niveles medidas y simuladas (arriba), diagrama de Taylor (abajo) - Concordia - 2008.

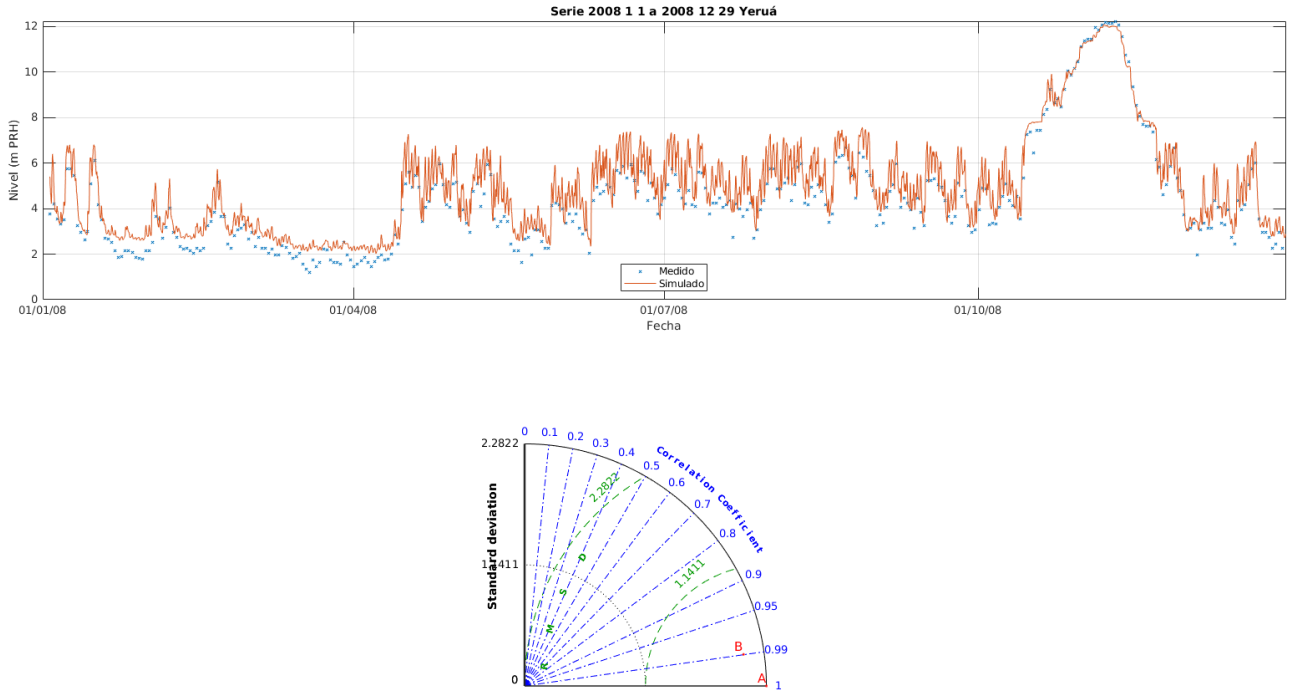


Figura 5.59: Series de niveles medidas y simuladas (arriba), diagrama de Taylor (abajo) - Yerúa - 2008.

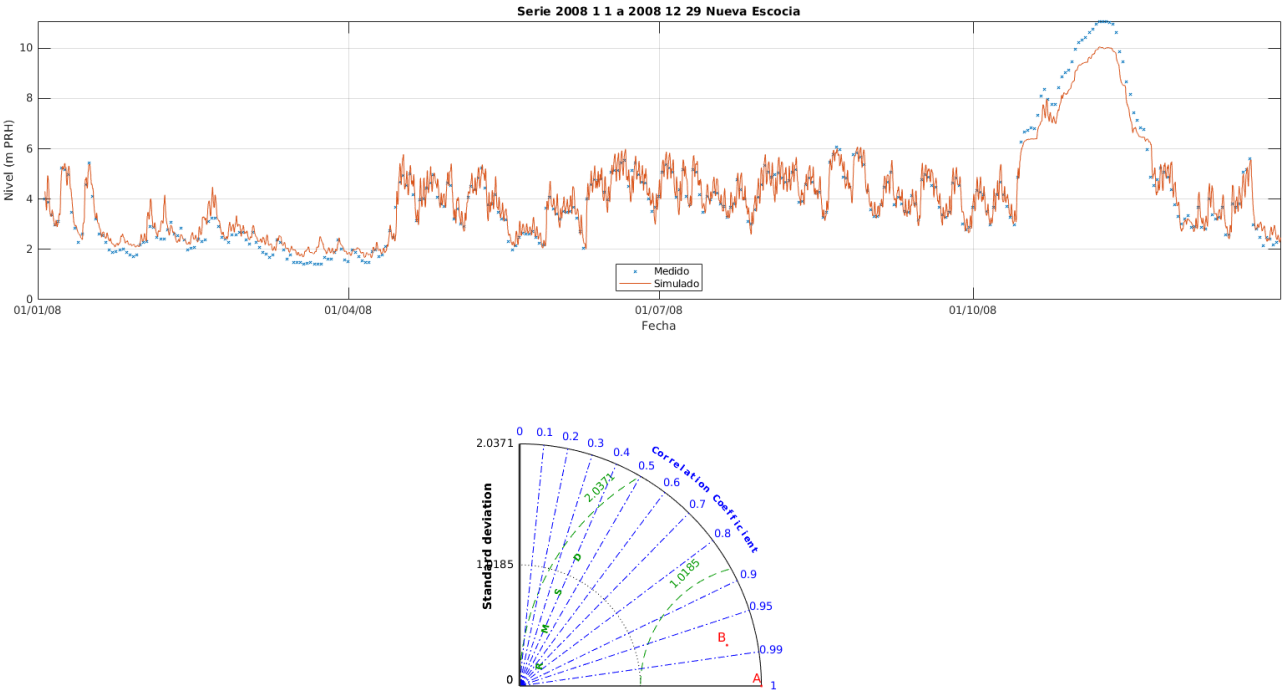


Figura 5.60: Series de niveles medidas y simuladas (arriba), diagrama de Taylor (abajo) - Nueva Escocia - 2008.

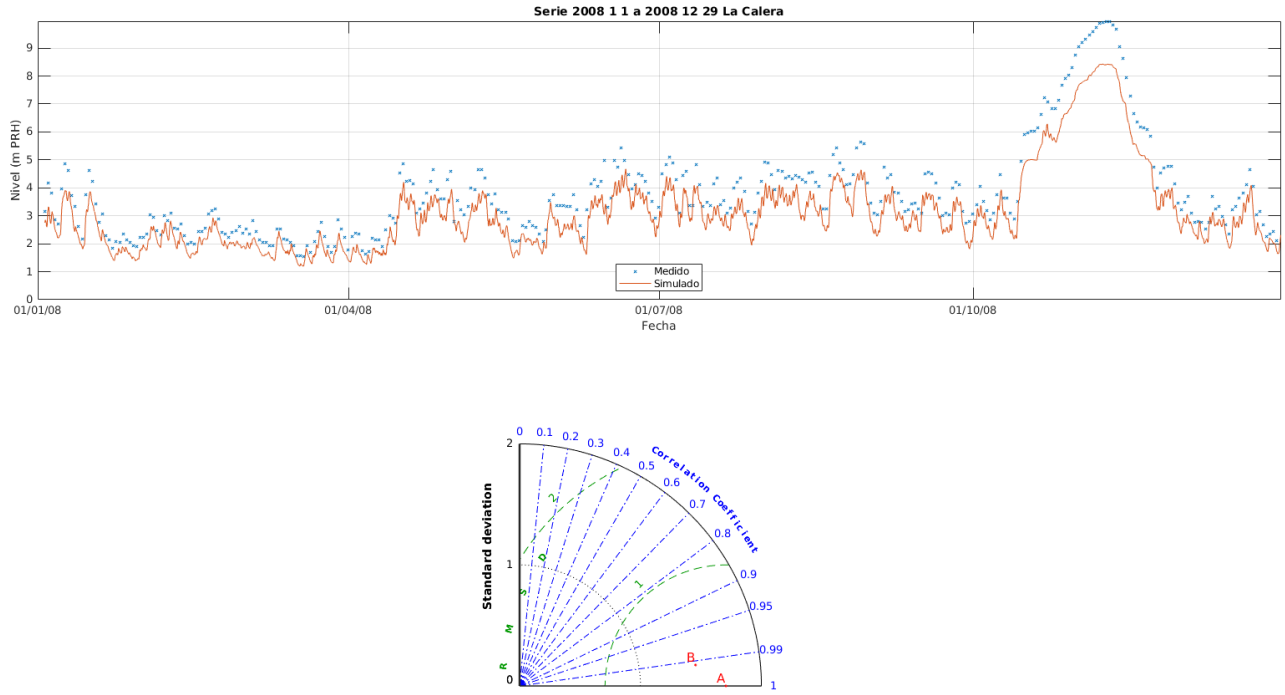


Figura 5.61: Series de niveles medidas y simuladas (arriba), diagrama de Taylor (abajo) - La Calera - 2008.

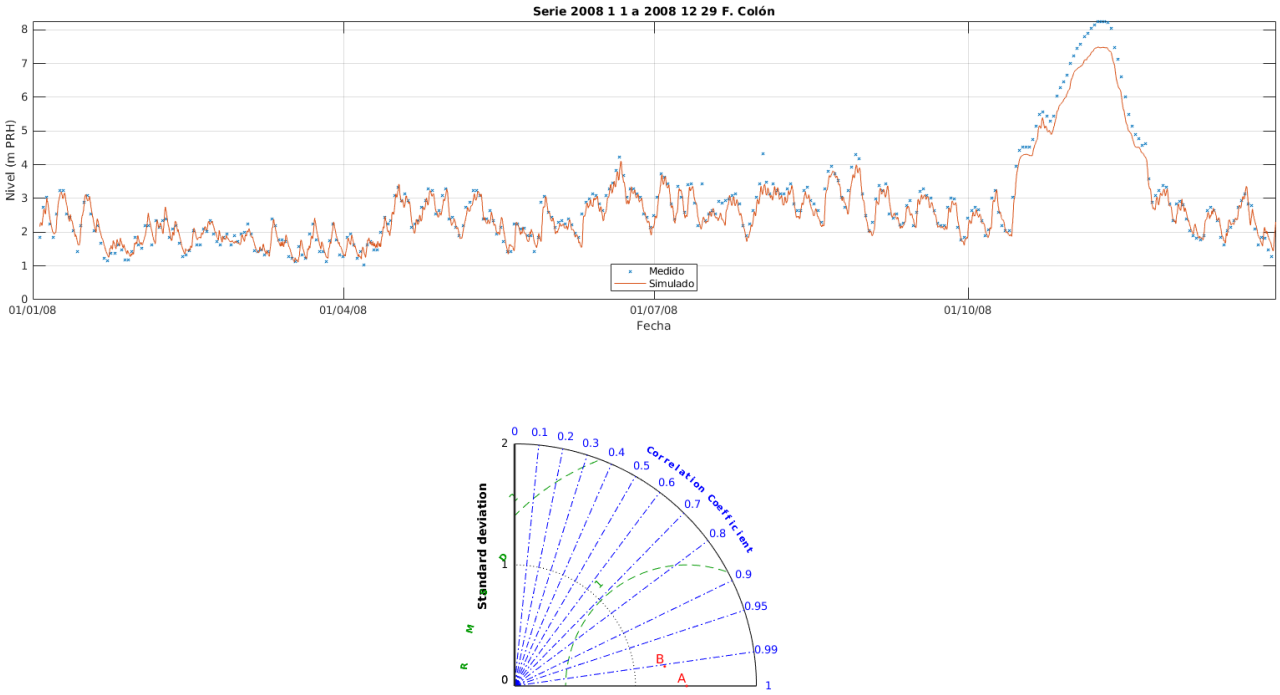


Figura 5.62: Series de niveles medidas y simuladas (arriba), diagrama de Taylor (abajo) - Fábrica Colón - 2008.

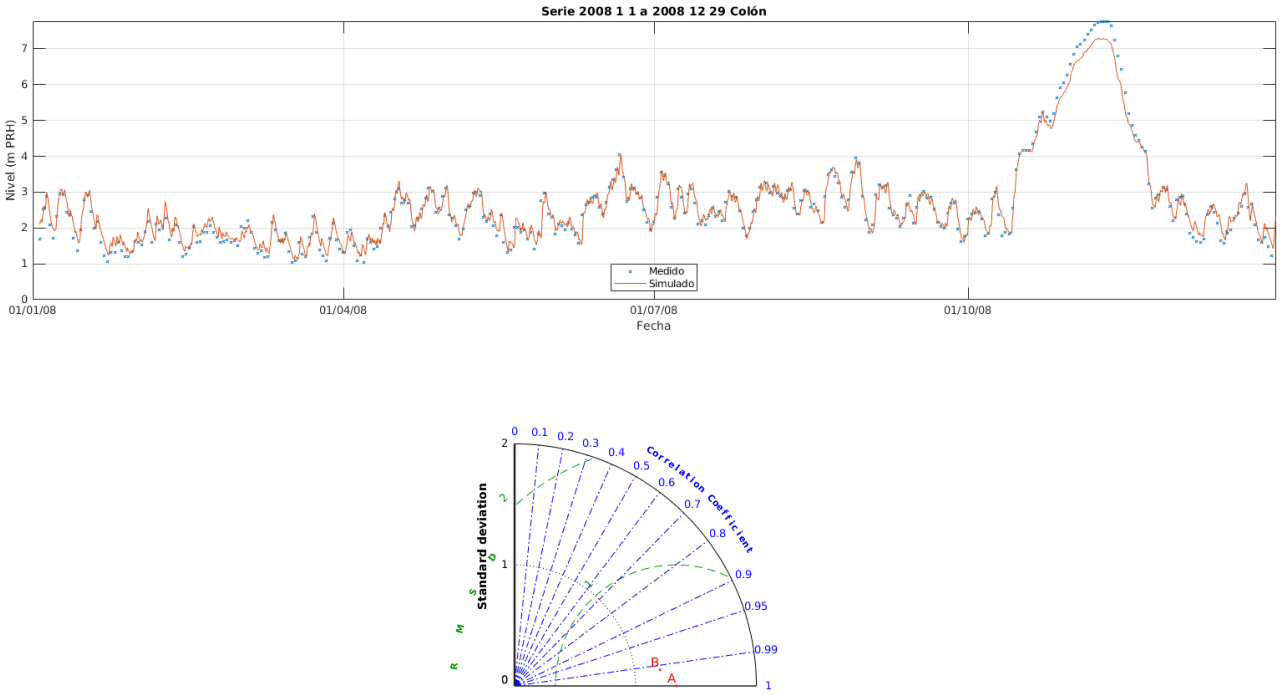


Figura 5.63: Series de niveles medidas y simuladas (arriba), diagrama de Taylor (abajo) - Colón - 2008.

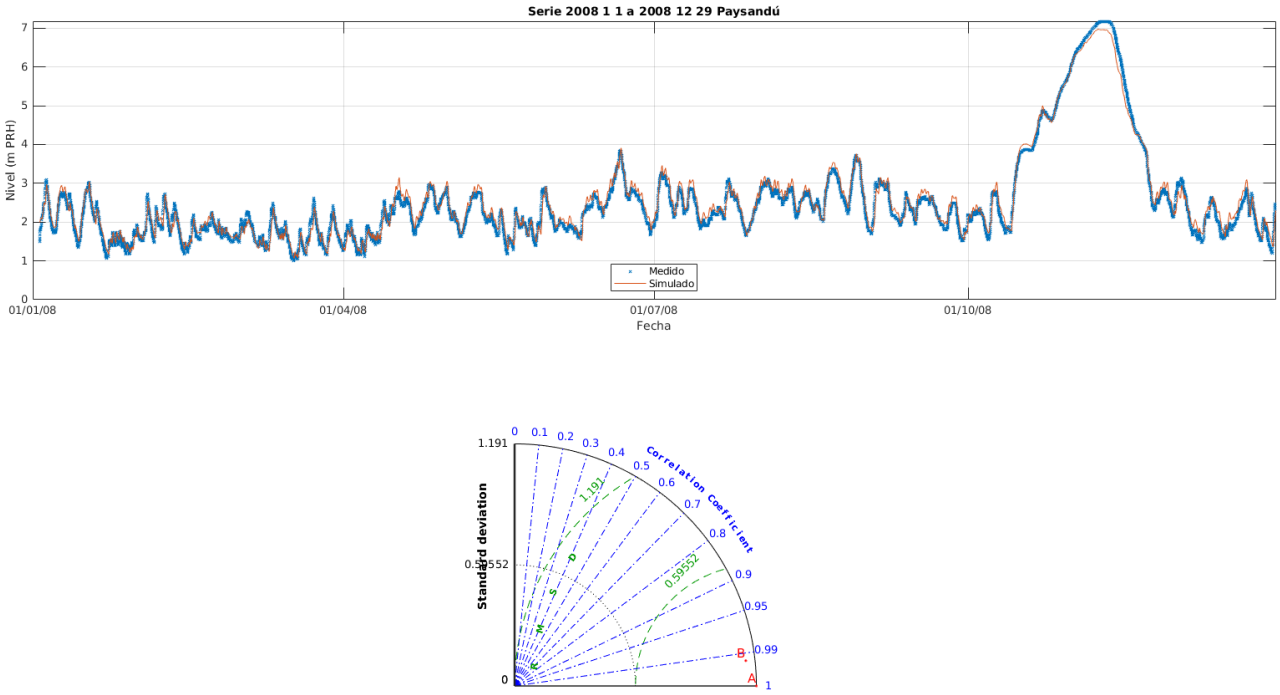


Figura 5.64: Series de niveles medidas y simuladas (arriba), diagrama de Taylor (abajo) - Paysandú - 2008.

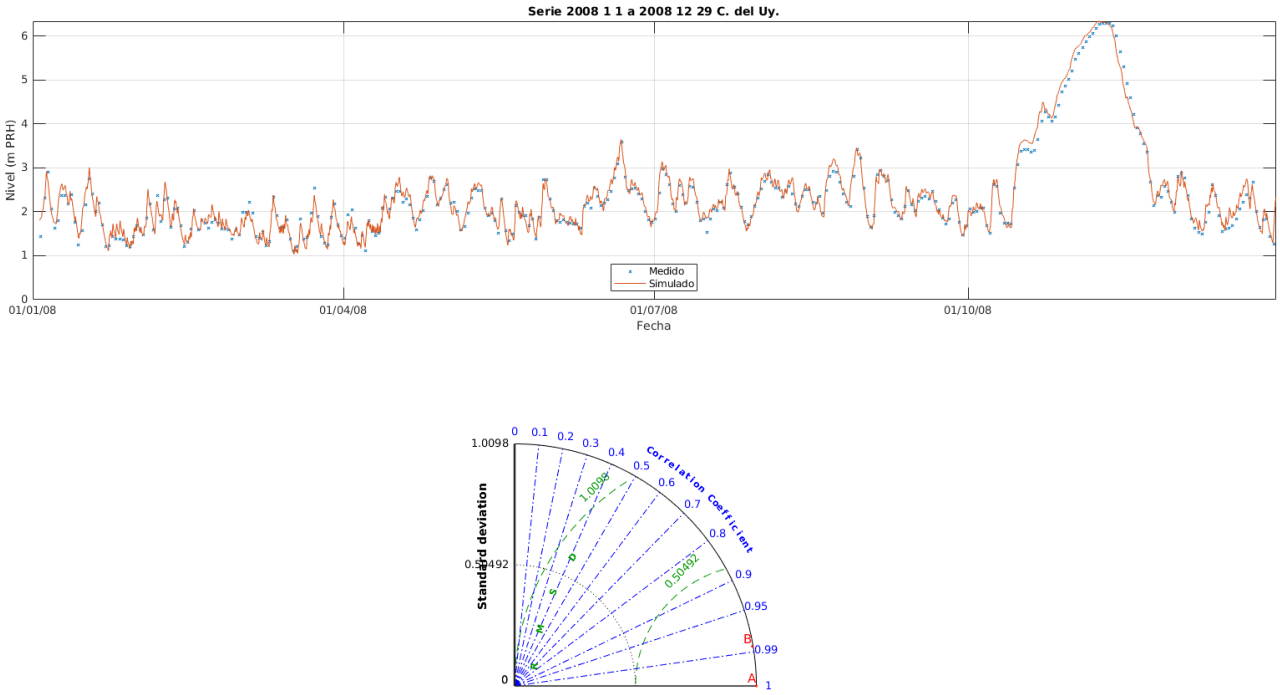


Figura 5.65: Series de niveles medidas y simuladas (arriba), diagrama de Taylor (abajo) - Concepción del Uruguay - 2008.

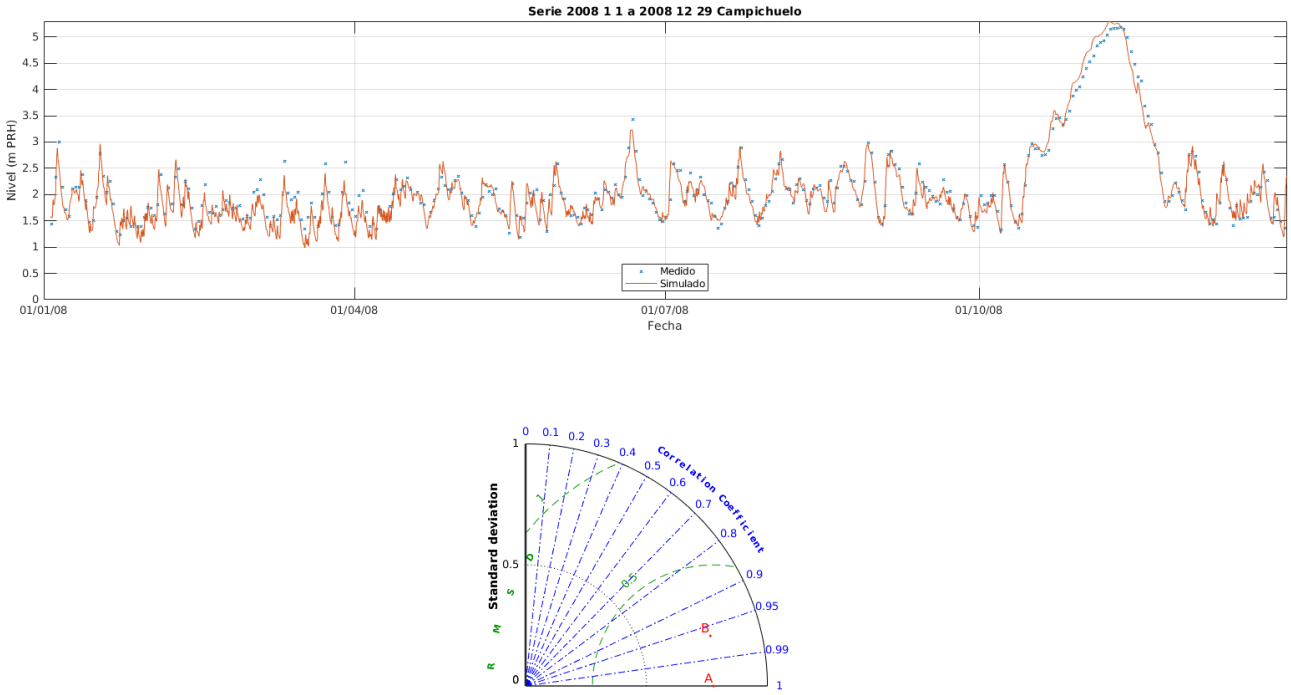


Figura 5.66: Series de niveles medidas y simuladas (arriba), diagrama de Taylor (abajo) - Campichuelo - 2008.

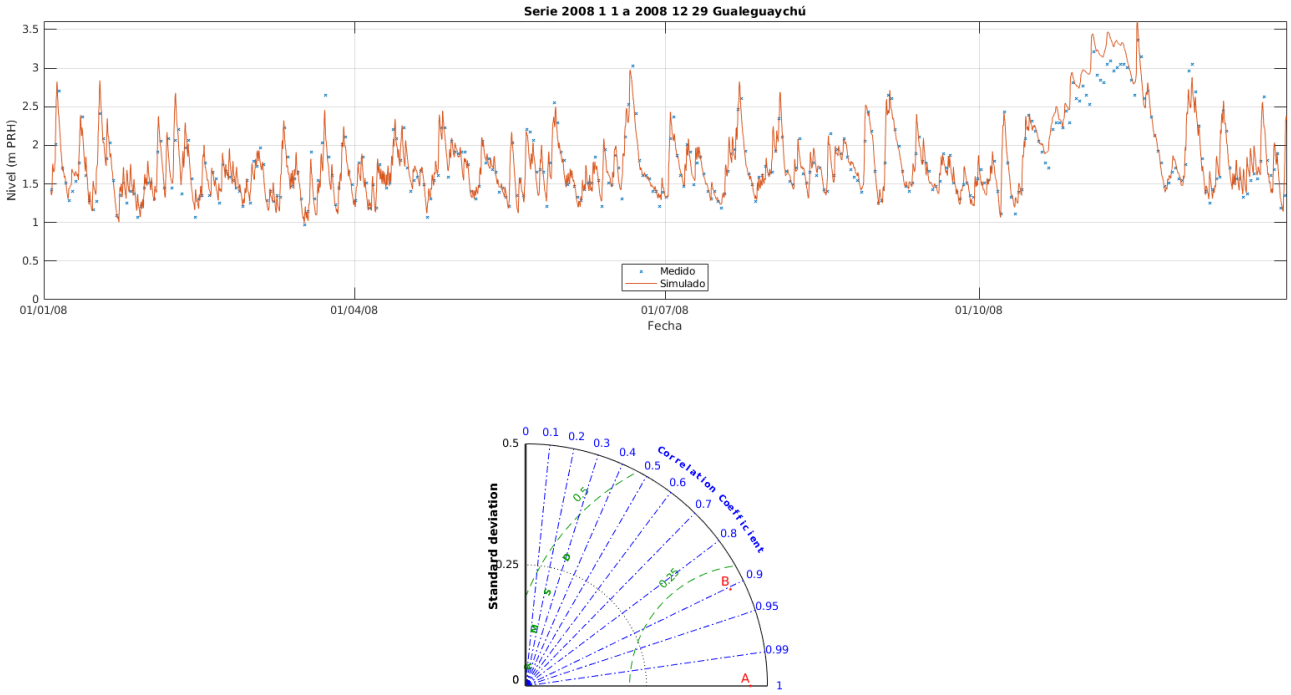


Figura 5.67: Series de niveles medidas y simuladas (arriba), diagrama de Taylor (abajo) - Gualeguaychú - 2008.

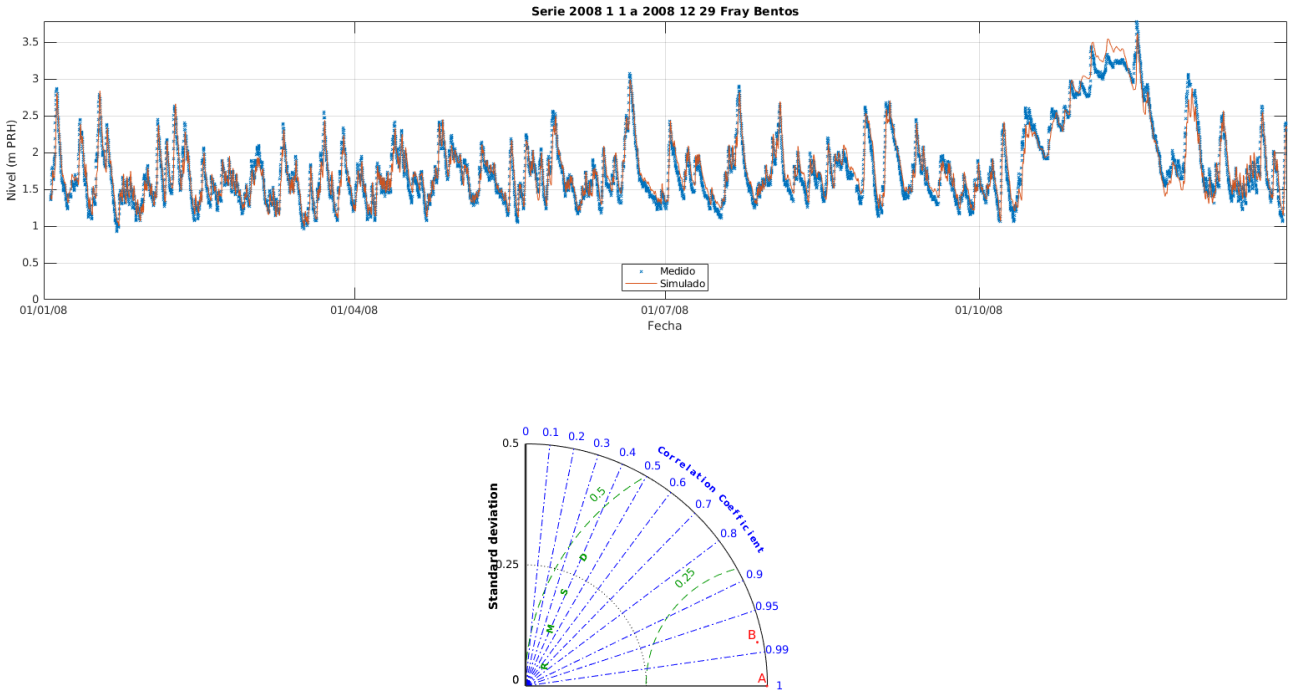


Figura 5.68: Series de niveles medidas y simuladas (arriba), diagrama de Taylor (abajo) - Fray Bentos - 2008.

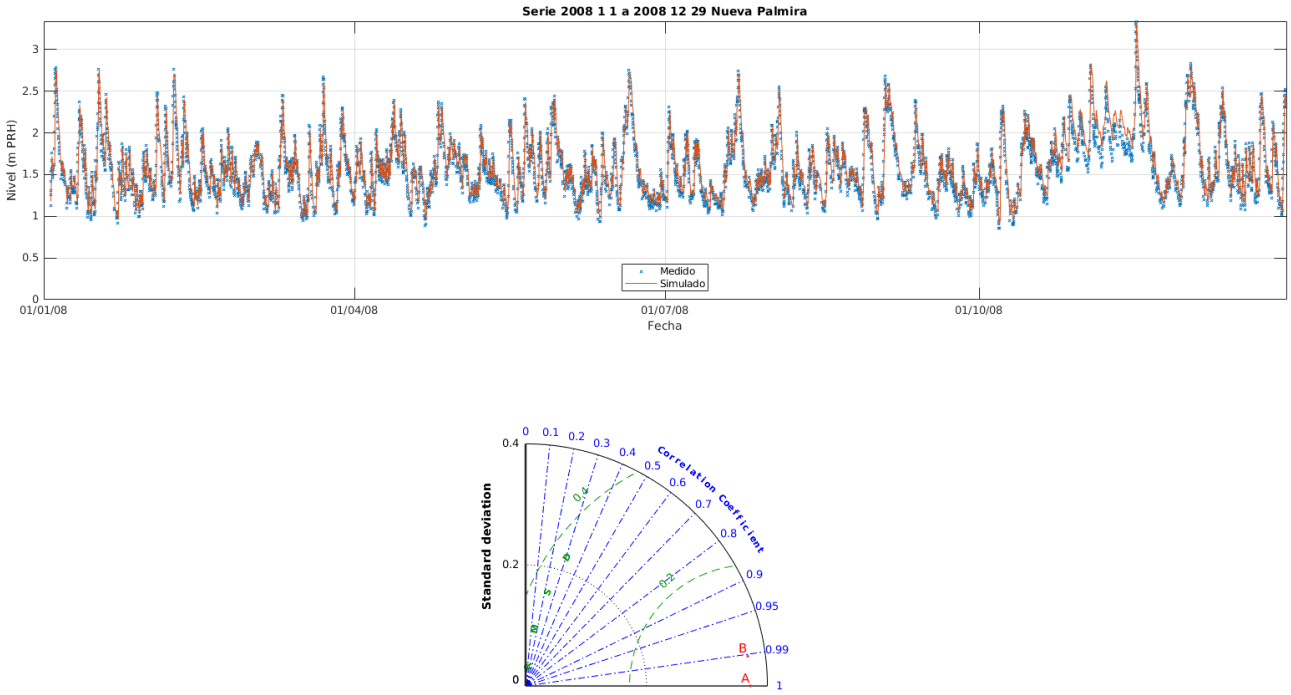


Figura 5.69: Series de niveles medidas y simuladas (arriba), diagrama de Taylor (abajo) - Nueva Palmira - 2008.

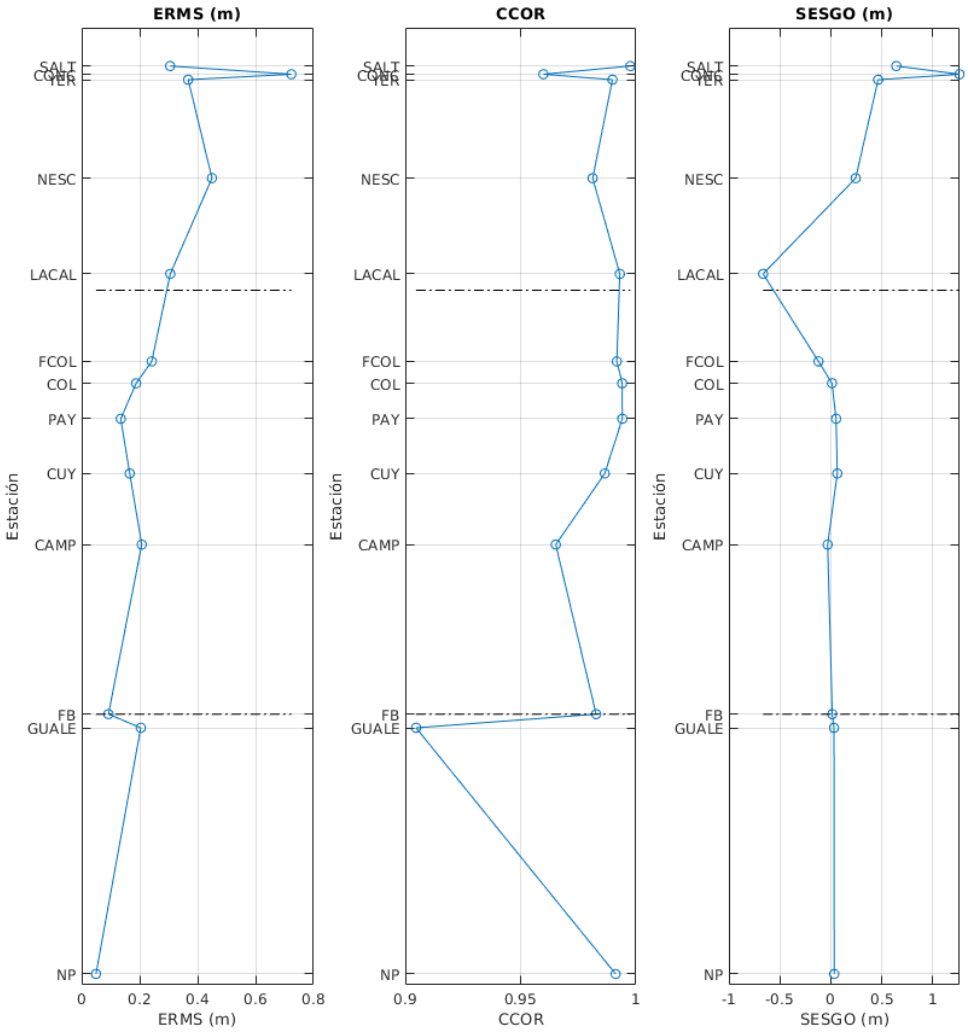


Figura 5.70: Error RMS (izquierda), coeficiente de correlación (medio), sesgo (derecha) - 2008.

Estación	ERMS	CCor	Sesgo	Media (m PRH)		STD (m)	
	(m)	-	(m)	Medida	Simulada	Medida	Simulada
Salto	0,31	0,998	0,64	5,41	6,05	2,66	2,41
Concordia	0,72	0,960	1,26	5,03	5,81	2,53	2,28
Yeruá	0,37	0,990	0,46	4,37	5,00	2,28	2,09
Nueva Escocia	0,45	0,981	0,24	4,06	4,11	2,04	1,78
La Calera	0,31	0,993	-0,66	3,82	3,13	1,71	1,47
F. Colón	0,24	0,992	-0,12	2,84	2,72	1,42	1,25
Colón	0,19	0,994	0,01	2,65	2,67	1,34	1,21
Paysandú	0,13	0,994	0,05	2,52	2,57	1,19	1,15
C. del Uruguay	0,17	0,987	0,06	2,34	2,38	1,01	1,01
Campichuelo	0,21	0,965	-0,03	2,15	2,09	0,78	0,79
Fray Bentos	0,09	0,983	0,01	1,79	1,81	0,50	0,49
Gualeguaychú	0,20	0,905	0,03	1,78	1,80	0,47	0,47
Nueva Palmira	0,05	0,991	0,03	1,61	1,61	0,37	0,37

Tabla 5.5: Resumen de indicadores de calidad de ajuste y parámetros estadísticos de comparación entre series medidas y simuladas para 2008.

5.6. 2009

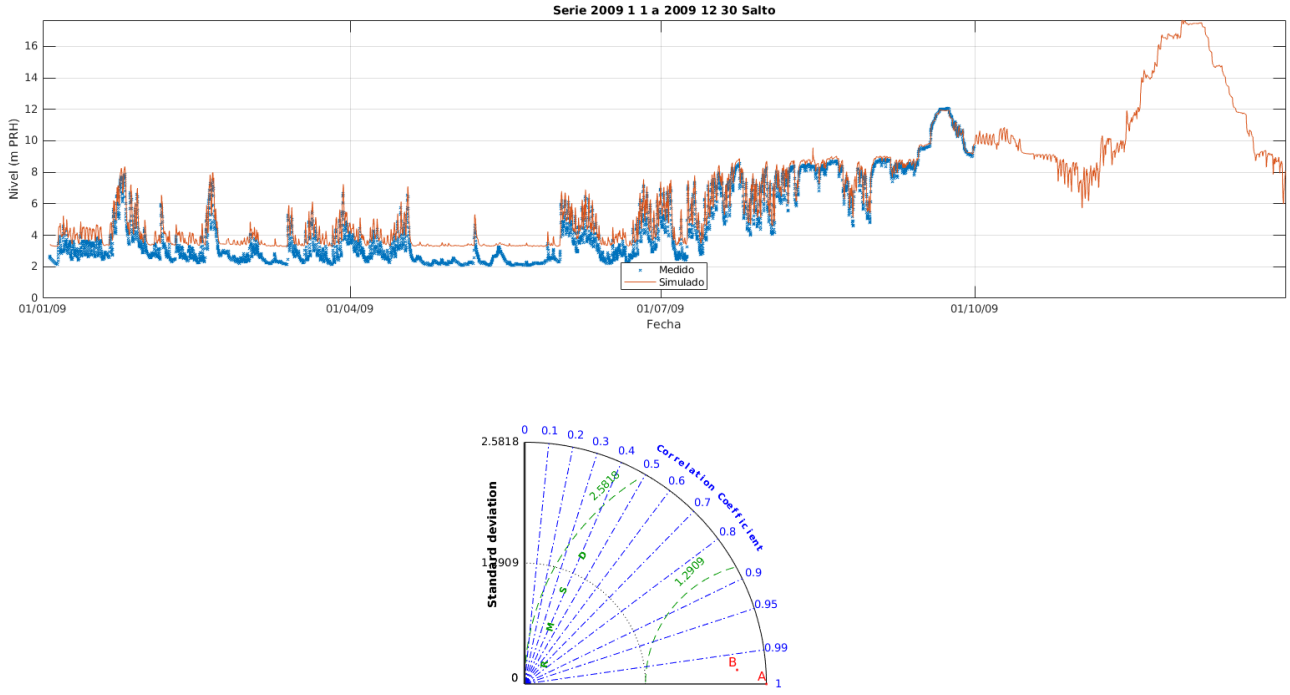


Figura 5.71: Series de niveles medidas y simuladas (arriba), diagrama de Taylor (abajo) - Salto - 2009.

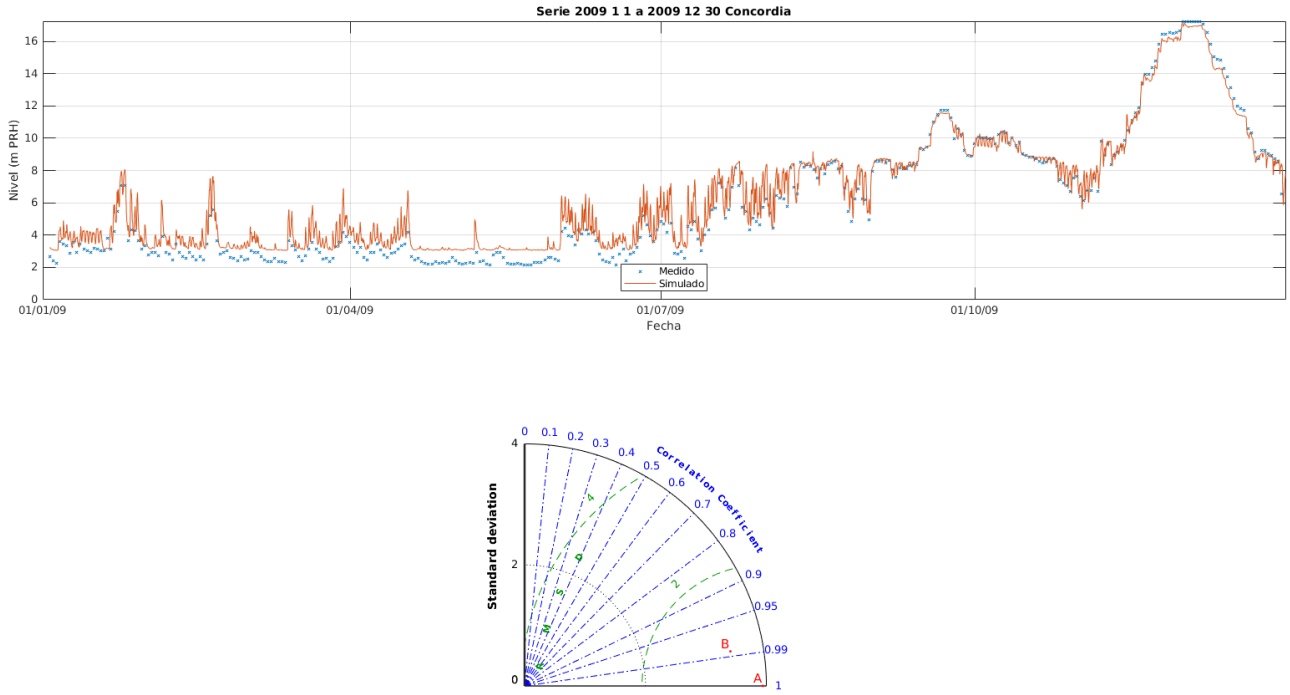


Figura 5.72: Series de niveles medidas y simuladas (arriba), diagrama de Taylor (abajo) - Concordia - 2009.

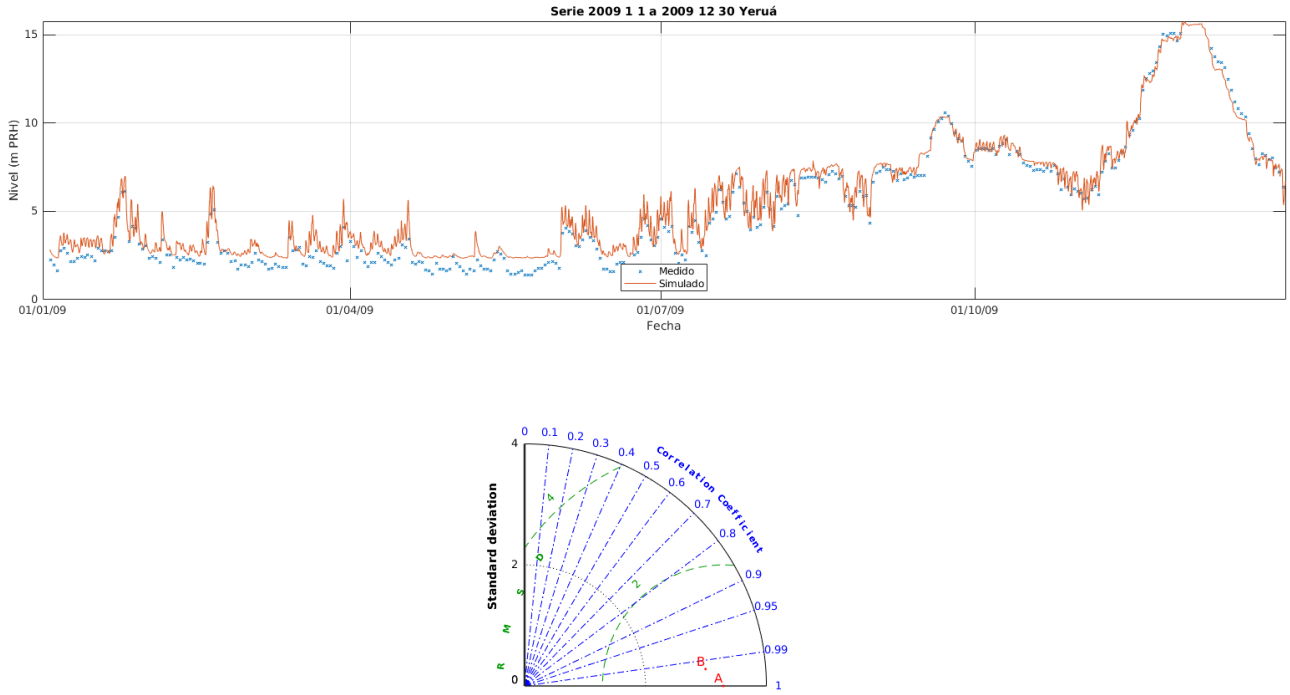


Figura 5.73: Series de niveles medidas y simuladas (arriba), diagrama de Taylor (abajo) - Yerúa - 2009.

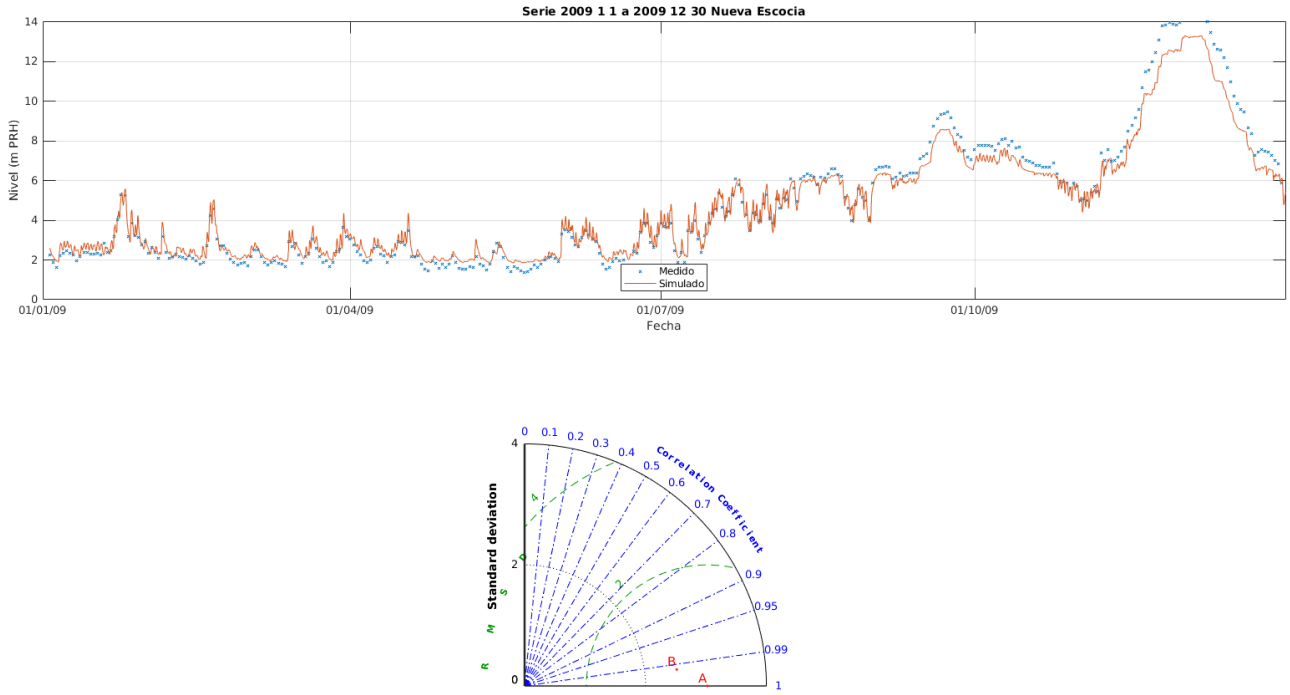


Figura 5.74: Series de niveles medidas y simuladas (arriba), diagrama de Taylor (abajo) - Nueva Escocia - 2009.

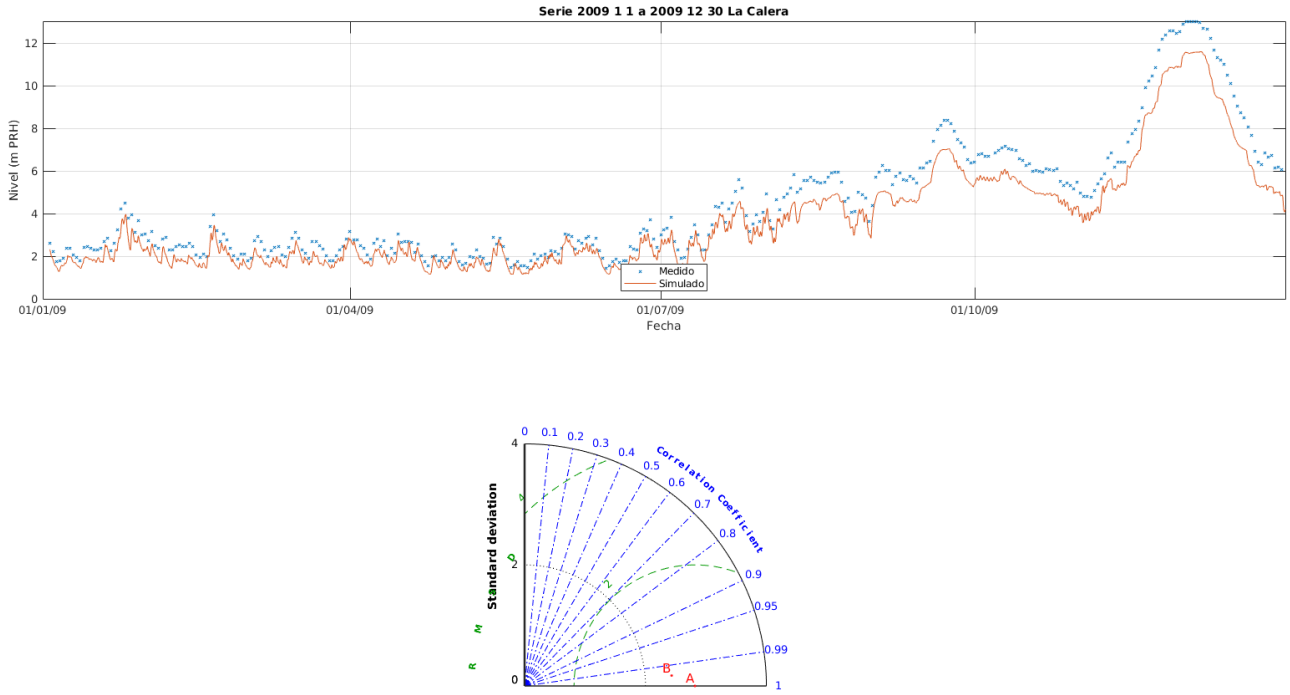


Figura 5.75: Series de niveles medidas y simuladas (arriba), diagrama de Taylor (abajo) - La Calera - 2009.

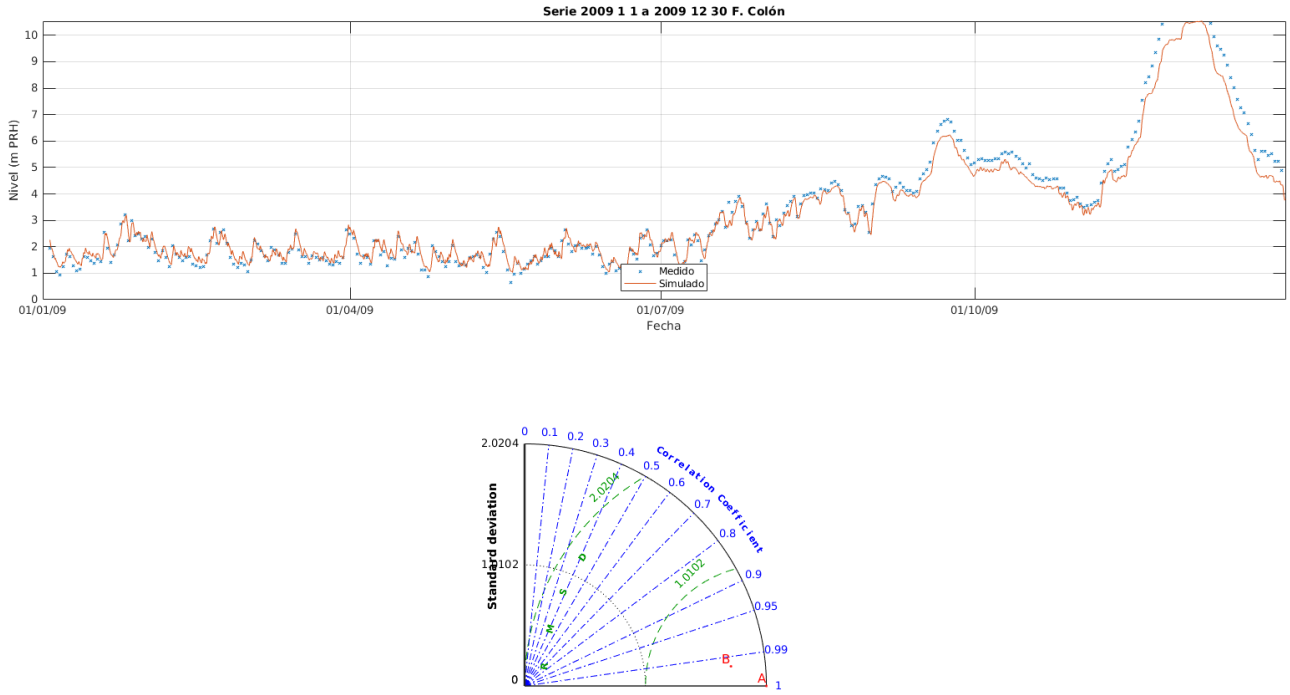


Figura 5.76: Series de niveles medidas y simuladas (arriba), diagrama de Taylor (abajo) - Fábrica Colón - 2009.

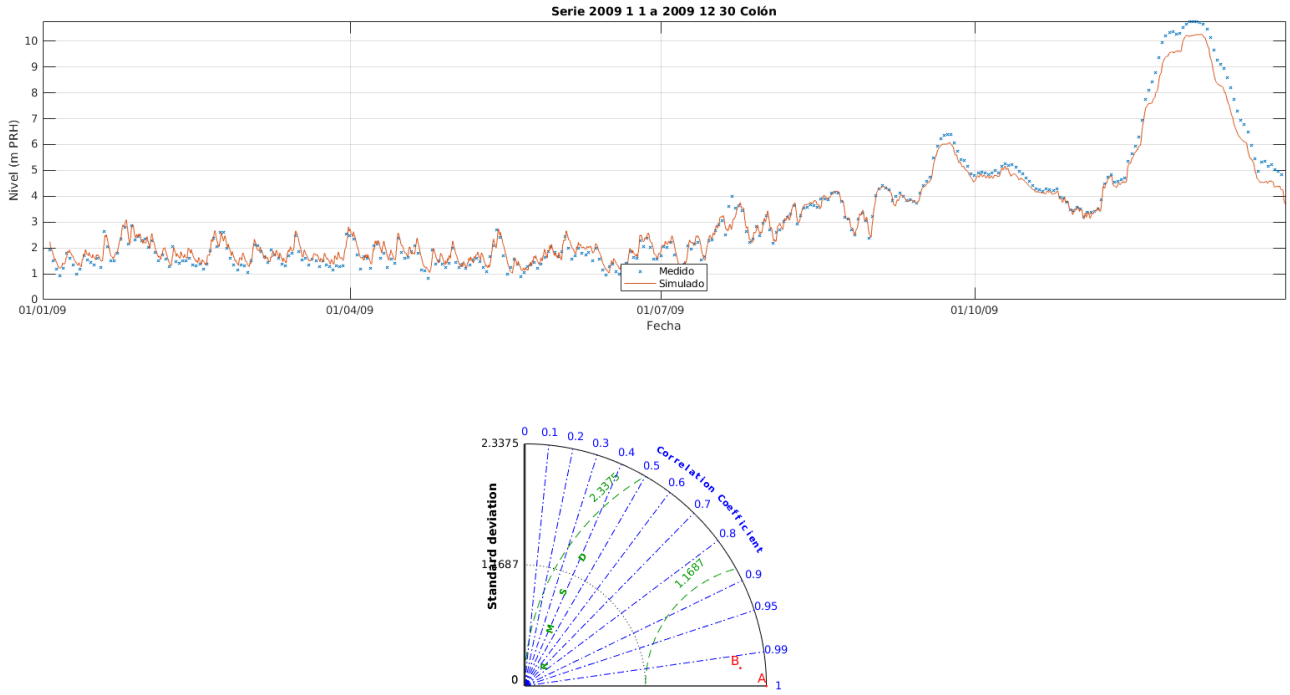


Figura 5.77: Series de niveles medidas y simuladas (arriba), diagrama de Taylor (abajo) - Colón - 2009.

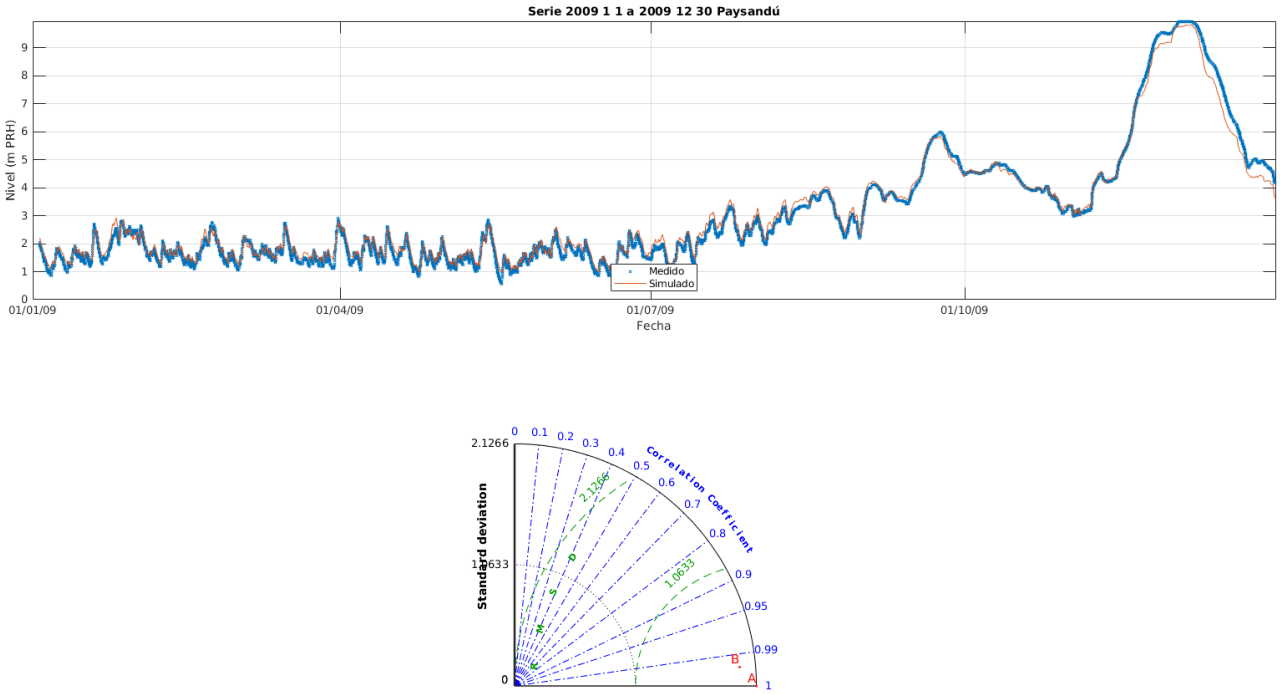


Figura 5.78: Series de niveles medidas y simuladas (arriba), diagrama de Taylor (abajo) - Paysandú - 2009.

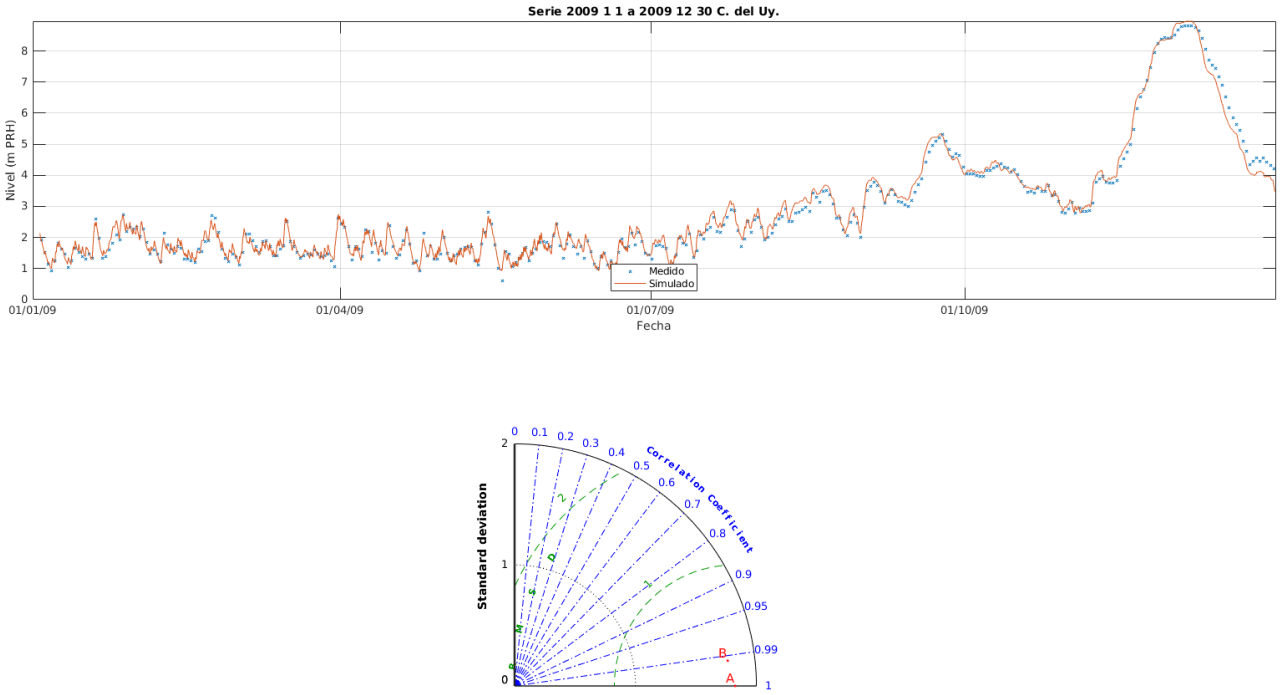


Figura 5.79: Series de niveles medidas y simuladas (arriba), diagrama de Taylor (abajo) - Concepción del Uruguay - 2009.

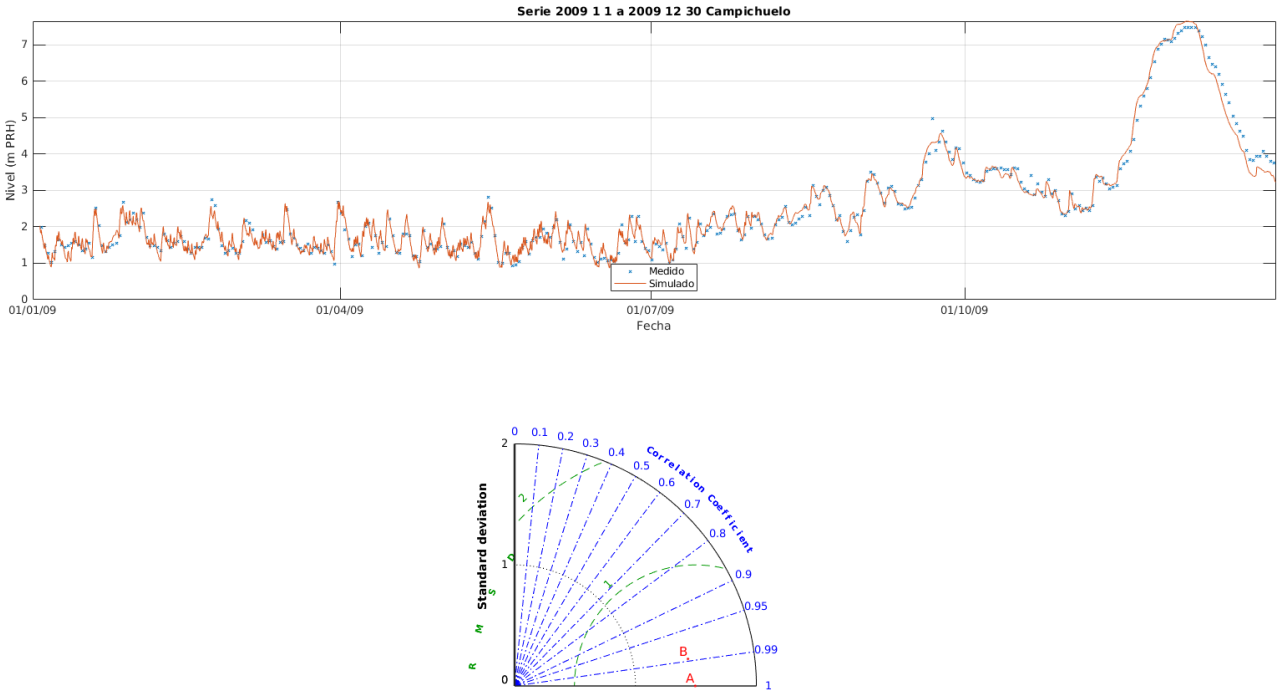


Figura 5.80: Series de niveles medidas y simuladas (arriba), diagrama de Taylor (abajo) - Campichuelo - 2009.

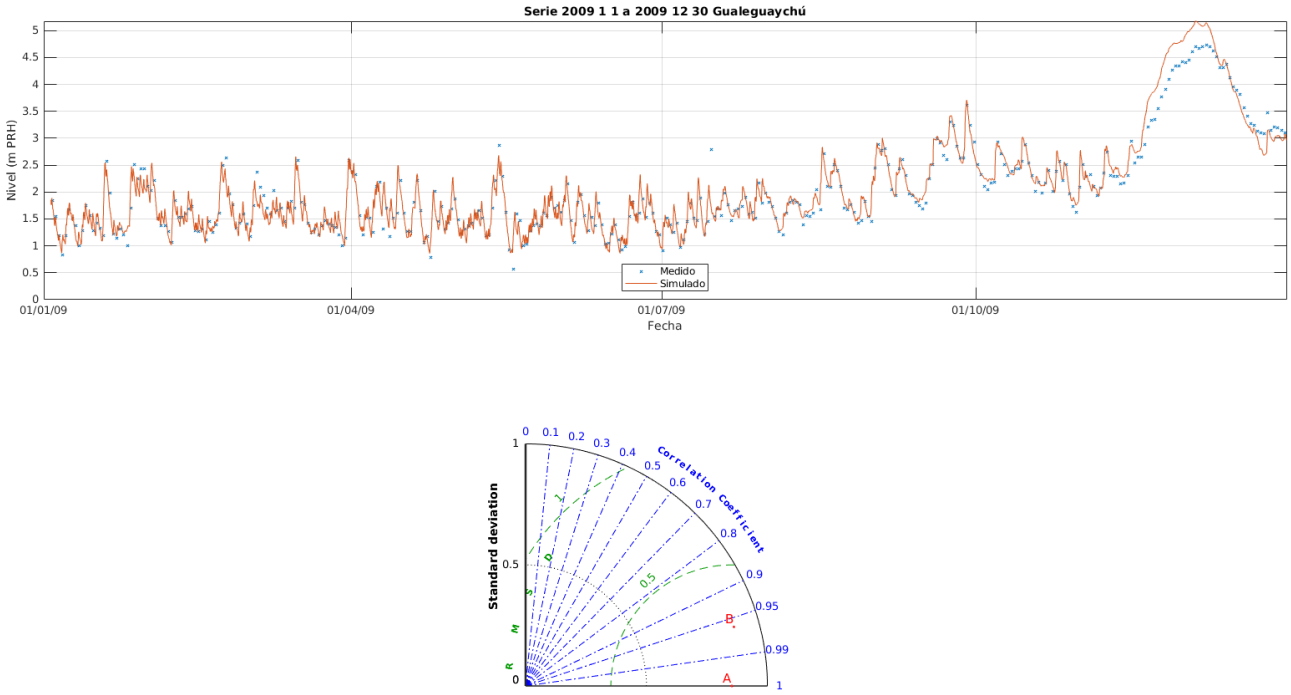


Figura 5.81: Series de niveles medidas y simuladas (arriba), diagrama de Taylor (abajo) - Gualeguaychú - 2009.

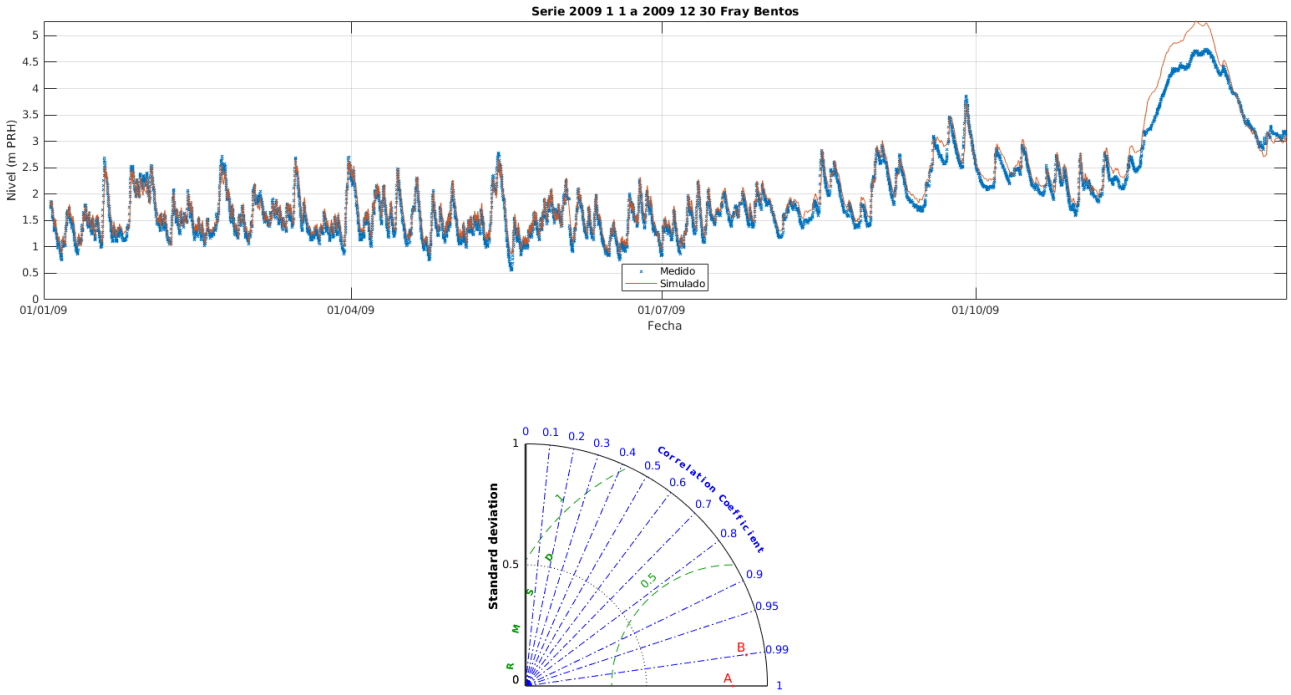


Figura 5.82: Series de niveles medidas y simuladas (arriba), diagrama de Taylor (abajo) - Fray Bentos - 2009.

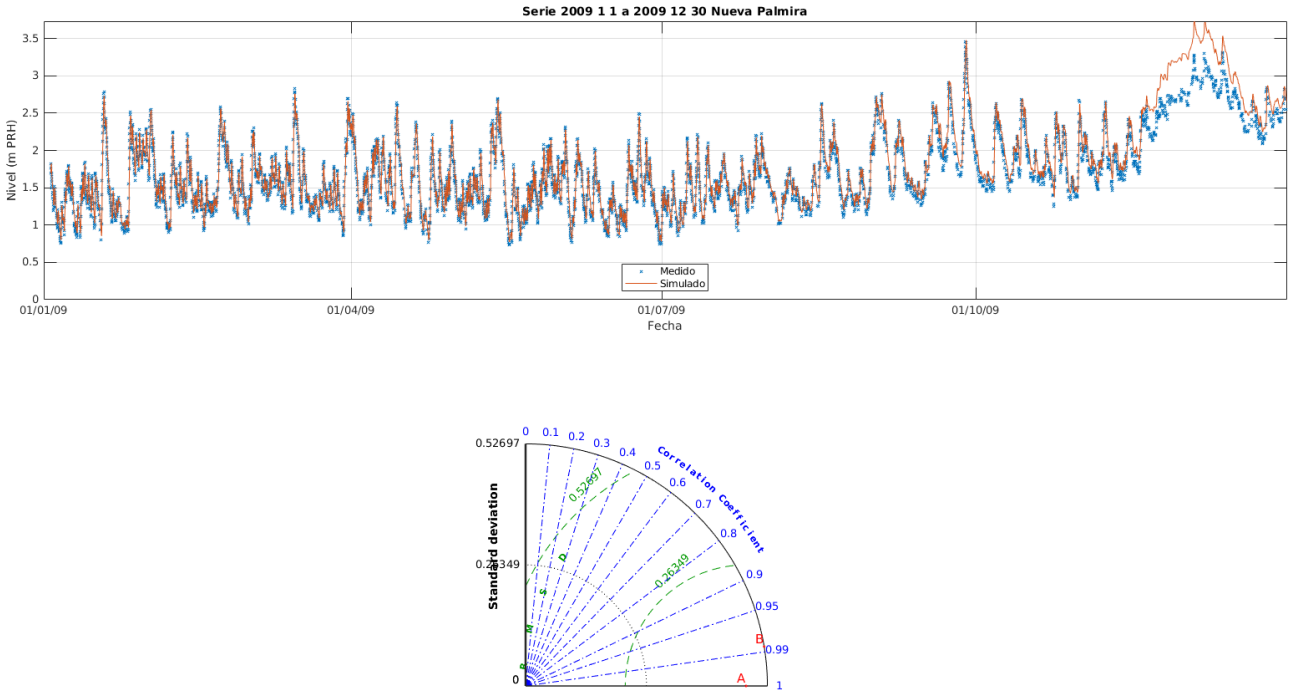


Figura 5.83: Series de niveles medidas y simuladas (arriba), diagrama de Taylor (abajo) - Nueva Palmira - 2009.

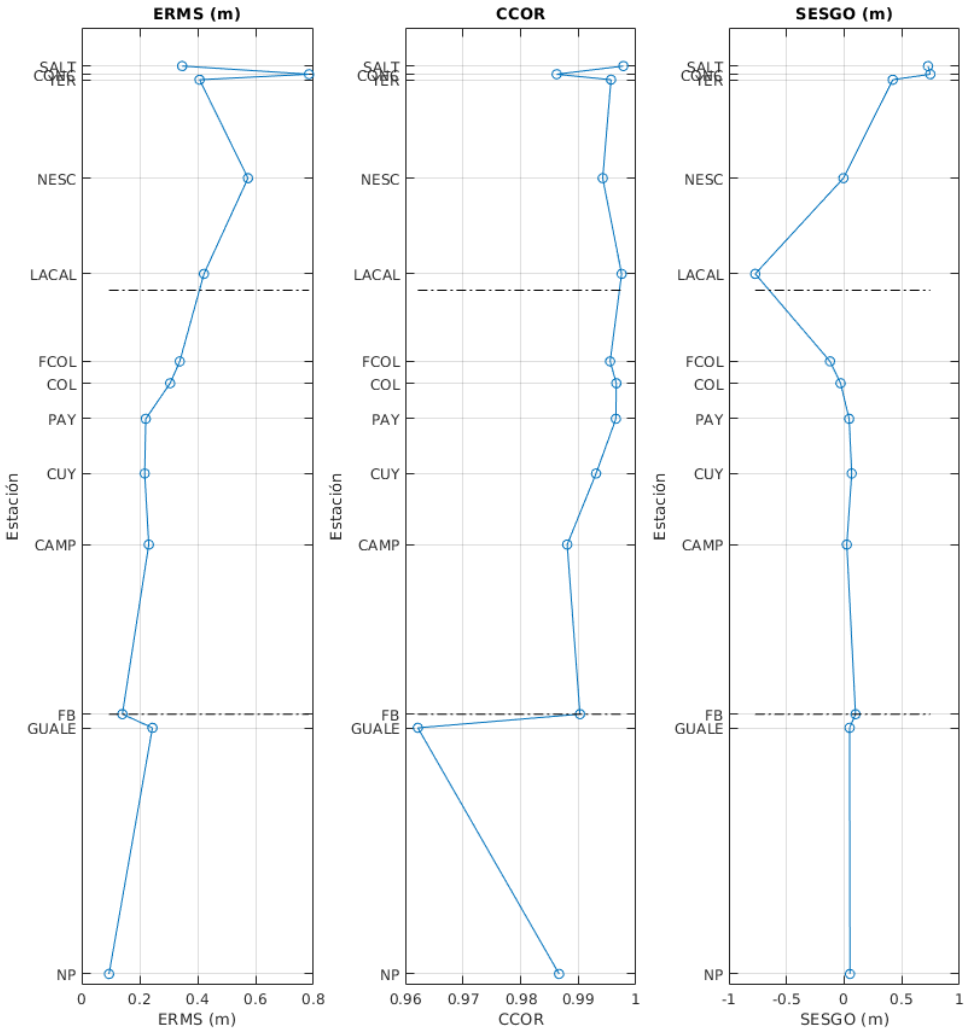


Figura 5.84: Error RMS (izquierda), coeficiente de correlación (medio), sesgo (derecha) - 2009.

Estación	ERMS	CCor	Sesgo	Media (m PRH)		STD (m)	
	(m)	-	(m)	Medida	Simulada	Medida	Simulada
Salto	0,35	0,998	0,73	4,60	6,84	2,58	2,27
Concordia	0,78	0,986	0,75	6,08	6,57	3,94	3,45
Yeruá	0,41	0,996	0,42	5,01	5,71	3,29	3,01
Nueva Escocia	0,57	0,994	-0,01	4,65	4,73	3,02	2,53
La Calera	0,42	0,998	-0,77	4,51	3,74	2,82	2,44
F. Colón	0,34	0,996	-0,12	3,17	3,31	2,02	1,73
Colón	0,31	0,997	-0,03	3,26	3,24	2,34	2,09
Paysandú	0,22	0,997	0,04	3,08	3,13	2,13	1,99
C. del Uruguay	0,22	0,993	0,06	2,84	2,90	1,83	1,78
Campichuelo	0,23	0,988	0,02	2,52	2,53	1,50	1,45
Fray Bentos	0,14	0,990	0,10	2,00	2,09	0,86	0,92
Gualeguaychú	0,24	0,962	0,05	2,04	2,08	0,85	0,90
Nueva Palmira	0,09	0,987	0,05	1,70	1,79	0,48	0,53

Tabla 5.6: Resumen de indicadores de calidad de ajuste y parámetros estadísticos de comparación entre series medidas y simuladas para 2009.