Global Gateway

Cofinanciado por la Unión Europea

cooperación alemana
DEUTSCHE ZUSAMMENARBEIT

PROGRAMA EUROCLIMA

Informe de entrega de productos

Producto 12: Modelo de calidad de agua en la Toma Hernández para escenarios de clima futuro

Nombre de la consultoría: Modelación hidrológica e hidrodinámica del río Paraná y modelo de detalle de calidad de agua en la Toma Hernández para distintos escenarios de clima futuro

Fecha: 30 de abril de 2026

País: Argentina

Producido: Instituto Nacional del Agua

Este informe se ha elaborado para el Programa EUROCLIMA de la Unión Europea,

Se enmarca en la acción Apoyo a la *Territorialización de la Acción Ambiental con foco en Adaptación al Cambio Climático*, que se desarrolla dentro del proyecto "Estudios para mejorar la gestión del agua en un contexto de cambio climático"

AUTORIDADES del INSTITUTO NACIONAL DEL AGUA

PRESIDENTE (A/C del despacho)

Lic. Bernardo Bartolomé HEREDIA

GERENTE DE PROGRAMAS Y PROYECTOS

Lic. Mercedes CURBELLO

SUBGERENTE LABORATORIO DE HIDRÁULICA

Dr. Ing. Pablo Ezequiel GARCÍA

SUBGERENTE LABORATORIO DE CALIDAD DE AGUAS

Bioq. Yanina EL KASSISSE

SUBGERENTE CENTRO REGIONAL LITORAL

Ing. Jorge COLLINS

PERSONAL PARTICIPANTE EN LA REALIZACIÓN DEL SIGUIENTE TRABAJO

SUBGERENCIA LABORATORIO DE HIDRÁULICA

Programa de Hidráulica Computacional

Mag. Lic. Nicolás E. ORTIZ
Dr. Ing. Pablo E. GARCIA
Ing. Martín SABAROTS GERBEC
Ing. Santiago GUIZZARDI
Mag. Ing. Martiano RE

SUBGERENCIA LABORATORIO DE CALIDAD DE AGUAS

Laboratorio Experimental de Tecnologías Sustentables

Lic. Bárbara GOMEZ
Lic. Marisol REALE
Téc. Qca. Lorena MARQUINA
Sra. Silvia MOYANO
Lic. Valeria RODRIGUEZ SALEMI
Doc. Virginia ZAPLARA
Téc. Qco. Nelson DIAZ
Lic. Carolina MUJICA
Sr. Germán LOZA

SUBGERENCIA CENTRO REGIONAL LITORAL

Lic. Esteban COLLINS
Ing. Rosana MAZZON
Sr. Guido STORANI
Ing. Jorge COLLINS
Dra. Silvia RAFAELLI
Ing. Agustina SPAIS

INFORME ELABORADO POR:

Mag. Lic. Nicolás E. ORTIZ
Ing. Martín SABAROTS GERBEC
Lic. Valeria RODRIGUEZ SALEMI
Lic. Marisol REALE
Lic. Bárbara GOMEZ

COLABORACIÓN EXTERNA:

Dr. Ing. Lucas DOMINGUEZ

1. INTRODUCCIÓN 6
2. OBJETIVOS 6
3. UBICACIÓN 7
4. DATOS DE BASE 8
4.1. Morfología de la laguna 9
4.1.1. Metodología 13
4.2. Forzantes 17
4.2.1. Condiciones de borde - hidrodinámicas 17
4.2.2. Selección de escenarios 22
4.2.3. Condiciones de borde - calidad de agua 25
5. SIMULACIONES DE ESCENARIOS FUTUROS 34
5.1. Escenarios de referencia 34
5.2. Escenarios futuros 39
5.2.1. SDT 39
5.2.2. Fe 46
5.2.3. Análisis en la Toma 51
6. ACLARACIÓN 56
7. CONCLUSIONES 57
8. REFERENCIAS 60

1. INTRODUCCIÓN

El presente informe corresponde al Producto 12 de la consultoría “Modelización Hidrológica e Hidrodinámica del Río Paraná y Modelo de Detalle de Calidad de Agua en la Toma Hernández para distintos Escenarios del Clima Futuro”, financiada por la Agencia Española de Cooperación Internacional para el Desarrollo (AECID) y coordinada por la Universidad Nacional de Quilmes.

Frente a los desafíos que plantea la creciente variabilidad hidrológica y climática sobre los sistemas de abastecimiento, resulta clave contar con información detallada sobre las condiciones actuales y proyectadas de la calidad del agua. En ese sentido, este componente integra tareas de relevamiento hidrométrico, muestreo intensivo, modelación ambiental y relevamiento de empresas prestatarias a fin de anticipar escenarios de riesgo para la operación de tomas de agua potable y aportar evidencia para la planificación de medidas de adaptación.

2. OBJETIVOS

- Analizar la calidad de agua en los diferentes escenarios de cambio climático, comparado con criterios establecidos en normativa nacional para su uso como fuente de agua potable.

Este informe presenta los resultados finales de la implementación del modelo

numérico de calidad de agua para clima futuro en la zona de la Toma Hernández en la ciudad de Santa Fe, brindando información relevante de variables físico químicas y niveles de agua críticos a largo plazo que permitan sumar herramientas a la toma de decisiones a las prestatarias de los servicios de agua potable.

3. UBICACIÓN

El área de interés se centra en la Toma Hernández de la ciudad de Santa Fe, por lo cual el dominio de modelación incluye a los cuerpos de agua que dominan la dinámica hídrica de la zona: Laguna Setúbal, aportes a la Laguna Setúbal desde los ríos Correntoso y Leyes, riacho Santa Fe, Canal de Acceso, río Colastiné, río Salado y río Paraná (Figura 1).

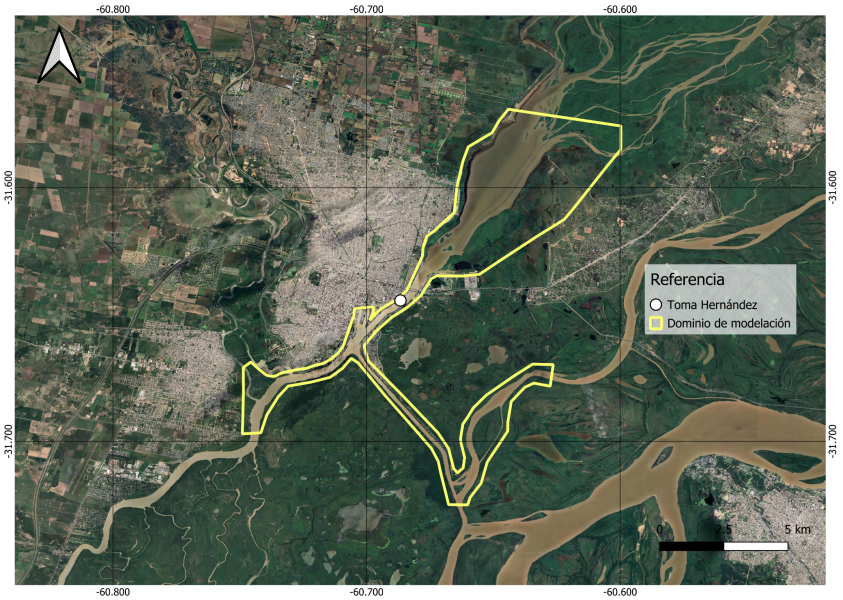


Figura 1. Ubicación del área de modelación en torno a la Toma Hernández, Santa Fe.

4. DATOS DE BASE

Para avanzar con las simulaciones de escenarios futuros, se realizó un análisis detallado de la información de base.

Parte de la información utilizada por el modelo ya fue presentada en el Producto 7 (Modelo de detalle de calidad de agua), como por ejemplo los ajustes de rugosidad del lecho, así como los coeficientes de viscosidad y difusión. Otra parte de la información se modifica en función del objetivo de las simulaciones, particularmente las condiciones de borde de nivel y caudal, que provienen del modelo hidrodinámico de Santa Fe (sistema San Javier, Setúbal y Coronda), del cual se detalla la implementación en el Producto 2 (Modelación Hidrodinámica).

Sin embargo, existe otra componente de la información que requirió un análisis adicional: la batimetría y las condiciones de borde de calidad de agua. En esta sección se presentan las consideraciones correspondientes a la batimetría, donde se tiene en cuenta la sedimentación en la laguna, así como las condiciones de borde de calidad, en las que se analizan los orígenes de los parámetros fisicoquímicos y su variación o correlación con las condiciones hidrológicas.

4.1. Morfología de la laguna

El sistema secundario fluvio-lacustre arroyo Leyes-Setúbal se trata de un sistema alimentado por dos vías principales: el arroyo Colastinecito, con vinculación directa con el río Paraná, y el río San Javier. Ambos confluyen y conforman el arroyo Leyes, con particiones de flujo que favorecen al San Javier en términos de caudal líquido, mientras que el Colastinecito —dado su contacto directo con el cauce principal— es el vector predominante de aporte sedimentológico hacia el sistema secundario. El proceso de captura y transferencia de sedimento se desarrolla en estrecha relación con los aportes anuales del río Bermejo, que se manifiestan de forma recurrente entre los meses de diciembre y mayo en el tramo analizado, período durante el cual la carga de sedimentos en suspensión alcanza sus valores máximos.

Una vez dentro del sistema secundario, el flujo y el sedimento se distribuyen a través de dos cauces principales que conducen hacia la laguna Setúbal: el arroyo Zanja Brava, alimentado principalmente por el arroyo Leyes y el Potrero, y el arroyo Correntoso, cuyo caudal tiene origen parcial en el arroyo Leyes y en los sistemas lagunares remanentes del ambiente, particularmente la laguna Capón y la laguna Leyes (Figura 2). Estas últimas, a su vez, reciben aportes de los arroyos Saladillo Amargo y Saladillo Dulce. Ambos cauces desembocan actualmente en la laguna Setúbal, y su jerarquización ha sido progresiva y sostenida en el tiempo, con sólidos pronósticos de continuidad futura. Al ingresar al cuerpo lagunar, las velocidades de flujo descienden abruptamente en el frente del delta, favoreciendo la deposición y, con ello, el avance progresivo del sistema deltaico sobre la laguna.

En cuanto a la distribución espacial de los sedimentos, en el frente del delta se depositan predominantemente materiales finos (limos), mientras que las arenas tienden a acumularse a lo largo de los cauces, donde las velocidades de flujo son suficientes para mantenerlas en transporte o en formas de lecho. Un comportamiento hidráulico particular, condicionado por la geología del sustrato, es la presencia de un fondo pleistoceno compuesto por materiales cohesivos de alta rigidez (Domínguez Rubén et al., 2023), que resulta difícilmente erosionable bajo condiciones hidrológicas ordinarias. Esta conformación de fondo abarca los principales cauces que alcanzan la laguna (Zanja Brava) y produce que el flujo se aceleré antes de llegar a la laguna Setúbal, provocando un gradiente de velocidad más abrupto en el frente del delta.

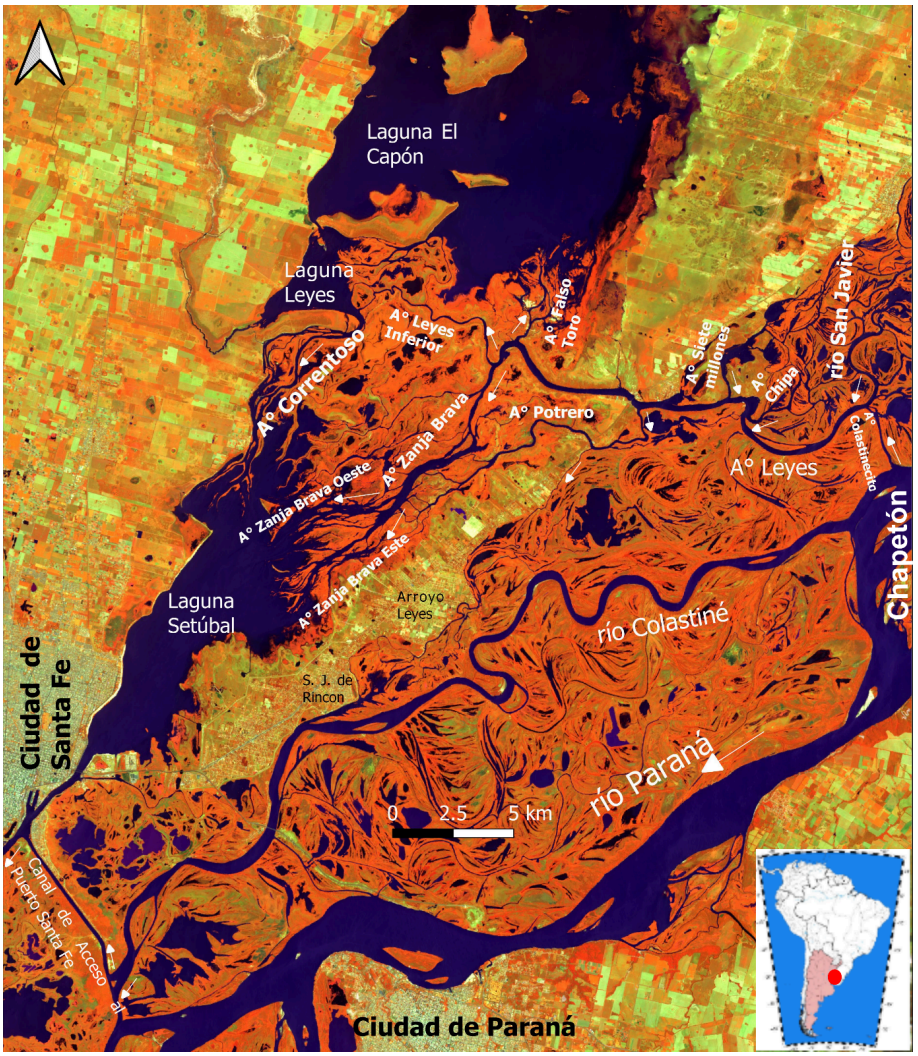


Figura 2.- Presenta el entorno de estudio y su vinculación con el río Paraná (cauce principal). Se citan en la misma los cursos de agua más jerarquizados del ambiente.

El comportamiento particular de este ambiente fluvio-lacustre, determinado por la dinámica activa de captura hídrica y sedimentaria brevemente descripta, se manifiesta de forma concreta en la agradación del frente deltaico. Este proceso registra tasas del orden de varias decenas a cientos de metros por año (Ramonell,

2021), lo que evidencia la elevada actividad sedimentaria del sistema (Figura 3). El análisis de Domínguez Ruben et al. (2023) indica que la reducción de la superficie lagunar presenta una tendencia de descenso acentuada, profundizada durante la última bajante extraordinaria del período 2020-2023. La Figura 3 ilustra esta contracción y los cambios morfológicos asociados, expresados en la extensión de nueva superficie emergida permanente —bancos e islas, indicada en color rojo—, patrón que se repite de manera consistente a lo largo del período 1984-2021. En dicho lapso se registran caídas consecutivas del área expuesta por agua sobre la laguna, producto de la formación progresiva de nuevas geoformas que reducen paulatinamente la lámina de agua disponible. Esta tendencia es claramente visible en el registro histórico del ambiente (Figura 3c) y constituye una señal inequívoca del avance sostenido del sistema deltaico. Todo indica que este proceso de transformación morfológica continuará desarrollándose en el tiempo, en tanto la vinculación estructural del sistema con el río Paraná garantiza una captura continua de flujo y sedimento.

Es en este contexto que el ambiente cuenta con estudios específicos orientados a caracterizar las posibles configuraciones futuras de estos cauces a lo largo de la actual laguna Setúbal (Convenio UNL-ENERFE, 2022). Dicho estudio plantea tres condiciones en planta —denominadas A, B y C— con distintas probabilidades de ocurrencia, las cuales responden a diferentes hipótesis de evolución geomorfológica del sistema. Para el presente informe se seleccionó la traza A, que consiste en dos cauces definidos sobre la laguna Setúbal y representa la configuración futura más plausible del drenaje en la región.

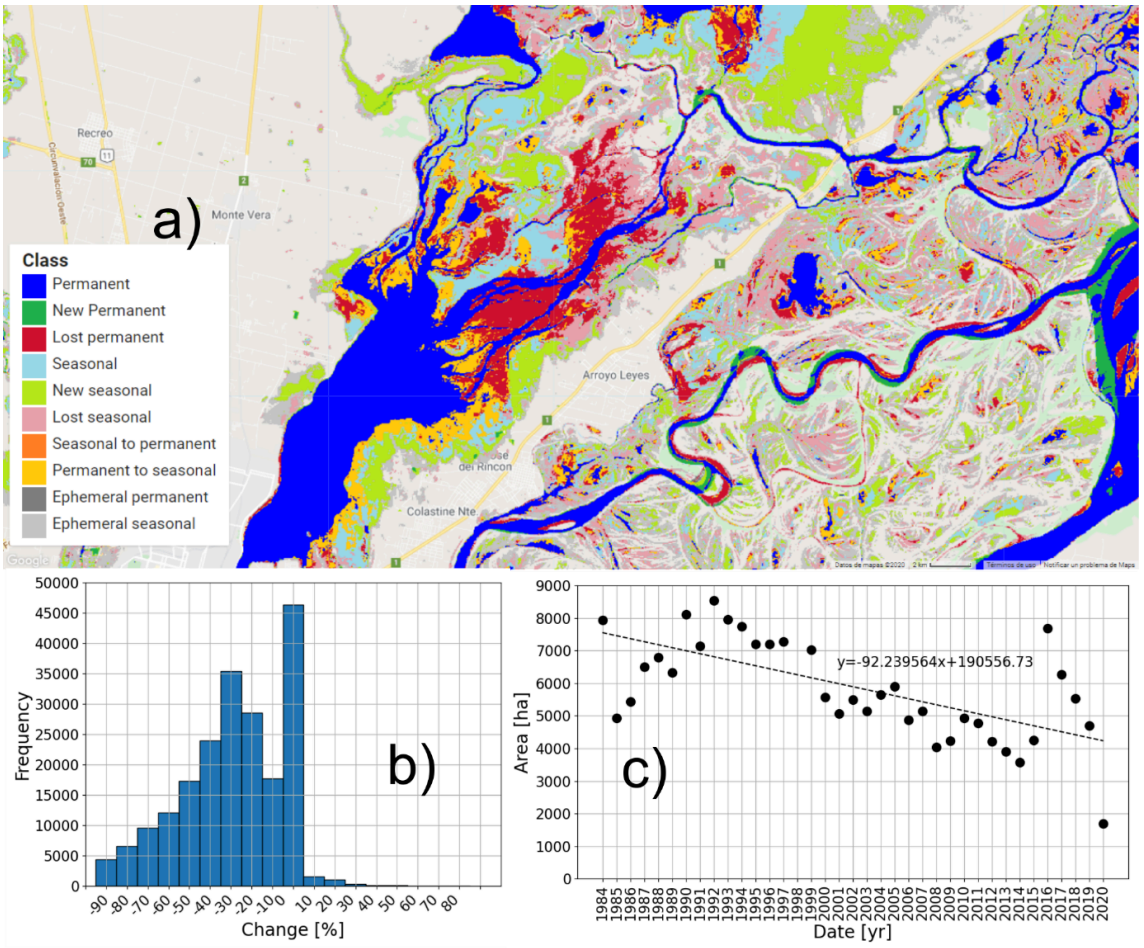


Figura 3.- a) Cambios generados en la superficie de agua expuesta desde 1984-2021 evaluados en la región de la laguna (Pekel et al., 2016). b) frecuencia de cambios evaluados sobre la región de la laguna. c) cobertura de área de superficie de agua expuesta y tendencia en el tiempo.

4.1.1. Metodología

Se seleccionó una traza futura para el presente estudio siendo esta la más posible de desarrollarse (Traza A, Convenio UNL-ENERFE, 2022). La metodología empleada en

este procesamiento fue la misma empleada en Convenio UNL-ENERFE, (2022), extendiendo la traza hacia aguas abajo en el espacio. Brevemente se resume la metodología de generación de la topobatimetría de los cauces, la cual consistió en la recreación de su geometría de fondo sobre la planicie, partiendo de la configuración en planta definida. Para ello se utilizaron los ejes de cauce en planta, los cuales incorporan la curvatura y el trazado esperado de los cauces en función de los procesos de avance deltaico identificados. A partir de esta configuración en planta, se implementó un modelo de recreación de fondo (Li y García, 2021) mediante el software pyRiverBed. Dicho modelo se basa en la teoría de Beck (1988), que describe la forma en sección transversal del lecho en cauces a partir de principios de equilibrio hidrosedimentológico, y requiere como parámetros de entrada una serie de características geométricas del sistema fluvial (ancho, profundidad, pendiente longitudinal, entre otros).

Para el caso se adoptaron parámetros ya empleados (Convenio UNL-ENERFE, 2022) que son: profundidad media de los cauces de 10 m, pendiente de fondo de 1 cm/km, y ancho (B) y curvatura en planta variables en función de la traza definida. La selección de estos parámetros se fundamentó en las características del ambiente en zonas aledañas (Figura 3) (Ramonell, 2021; Domínguez Ruben et al., 2023). Del software pyRiverBed se obtuvo la nube de puntos XYZ correspondiente a los fondos de los cauces generados, la cual constituye el insumo topobatimétrico principal para la configuración del modelo hidrodinámico. Esta morfología de fondo fue incorporada a un plano horizontal representativo del valle en condición futura, a una cota constante de 12 m, conformando así la superficie topográfica de la planicie sobre la cual se

desarrollarán los nuevos cauces (Figura 4). Toda la información topobatimétrica disponible fue postprocesada en un sistema de referencia altimétrico común, correspondiente al cero del Instituto Geográfico Nacional (IGN), con el fin de garantizar la consistencia y comparabilidad de los datos entre las distintas fuentes. El sistema de proyección cartográfica utilizado fue Gauss-Krüger Faja 5 y el manejo de todos los datos geográficos fueron en el paquete de software QGIS (QGIS, 2019).

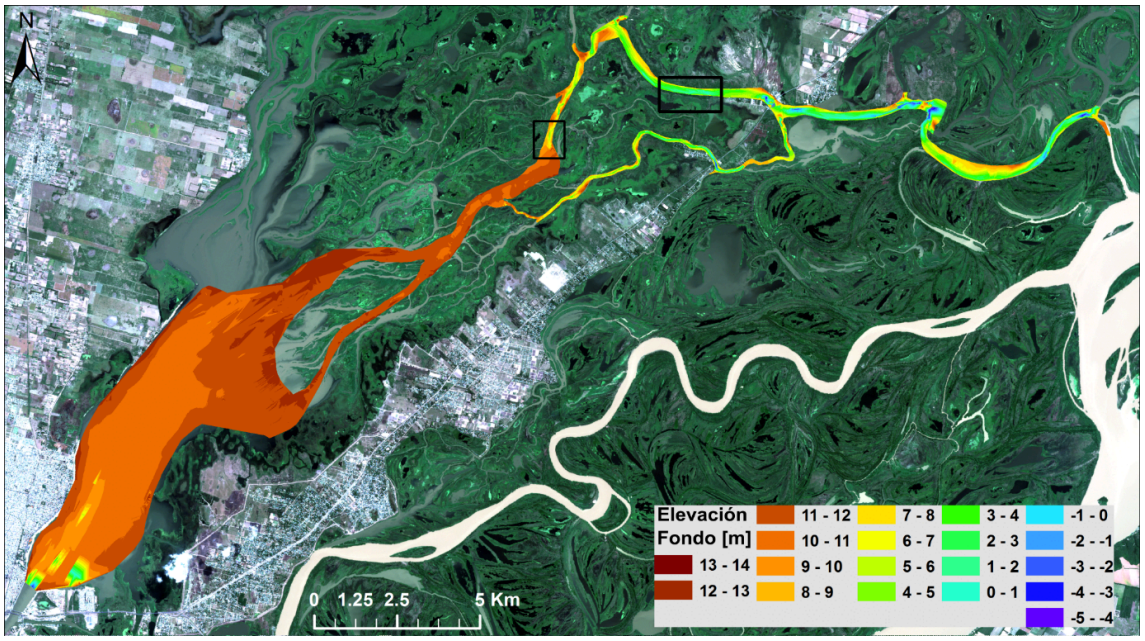


Figura 4.- Batimetrías del tramo de estudio sistema lagunar y cauces secundarios (Dominguez Ruben et al., 2023).

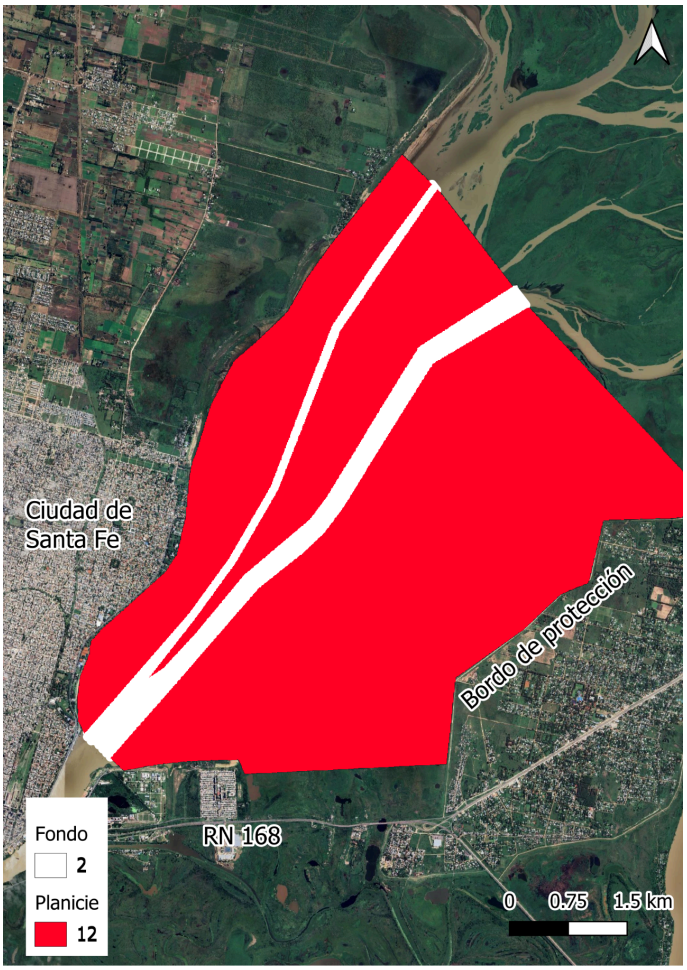


Figura 5.- Representación aproximada de la topobatimetría resultante del planteo futuro del sistema laguna Setúbal.

4.2. Forzantes

4.2.1. Condiciones de borde - hidrodinámicas

Las condiciones de borde hidrodinámicas del modelo de detalle 2D fueron definidas a partir de los resultados del Modelo 2 – Santa Fe, presentado en el Producto 6: Modelación Hidrodinámica. Dicho modelo representa el comportamiento del río San Javier, el sistema Setúbal, río Salado y el río Coronda, abarcando espacialmente el dominio en el cual se inserta el modelo bidimensional de detalle. De esta manera, el modelo de mayor escala provee un marco hidrodinámico consistente para la definición de las condiciones de borde del modelo 2D.

En particular, a partir del Modelo 2 se obtuvieron las condiciones de caudal en el borde aguas arriba y de nivel en el borde aguas abajo del dominio de cálculo. En la Figura 6 se presentan las condiciones de borde adoptadas para el modelo 2D, indicando la localización de las secciones de extracción de caudales y niveles.

Cabe señalar que, para la definición de estas condiciones, se siguió un esquema de modelación encadenada. En una primera etapa, se realizaron las simulaciones correspondientes al Modelo 1 – Paraná, en el cual se incorporaron los distintos escenarios de cambio climático. A partir de estas simulaciones se obtuvieron series de caudales y niveles en la sección del Túnel Subfluvial (estación de referencia regional dado su volumen de información hidrométrica temporal), las cuales constituyen la entrada hidrodinámica para el Modelo 2 (Santa Fe).

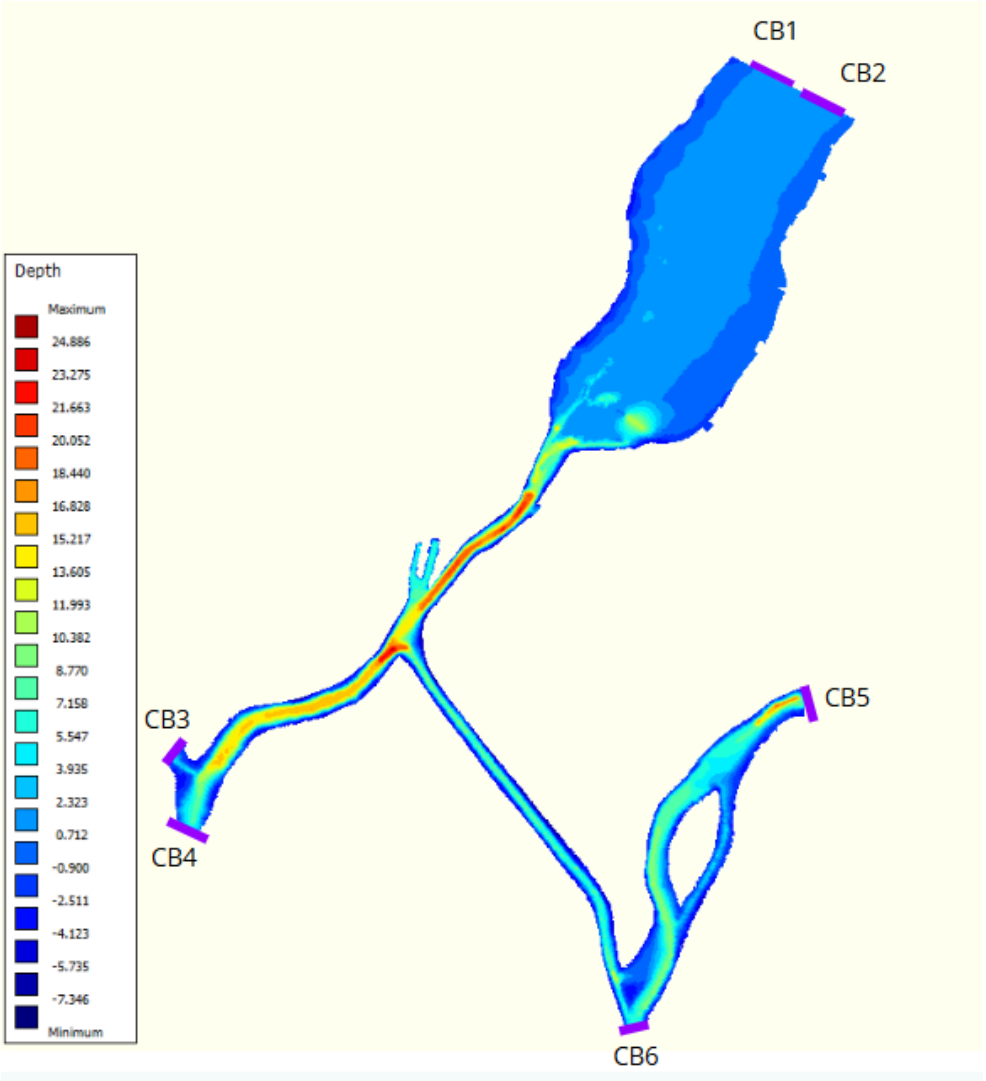


Figura 6. Conformación del fondo y dominio de cálculo junto a las condiciones de borde utilizadas.

En la Figura 7 se muestran los caudales obtenidos en Paraná para los distintos escenarios y horizontes de análisis. En particular, se presentan los valores medios asociados al percentil 50% (condición representativa) para cada uno de los modelos climáticos considerados, agrupados según los escenarios SSP2.6, SSP4.5 y SSP8.5, y discriminados en horizontes de corto, mediano y largo plazo. Asimismo, se incluye el período histórico de referencia correspondiente a las simulaciones climáticas.

De manera análoga a lo desarrollado en el Producto 2: Modelación Hidrológica, las condiciones extremas de bajantes y crecidas fueron caracterizadas mediante el análisis de los percentiles 10 y 90, respectivamente. Para cada escenario y horizonte temporal, se determinaron las envolventes mínima y máxima a partir del conjunto de cinco modelos climáticos utilizados. La Figura 7 presenta la síntesis de este análisis, mostrando la variabilidad asociada a las condiciones hidrológicas extremas.

El análisis de los percentiles calculados a partir de la serie histórica observada presentan una amplitud mayor que la estadística derivada de los modelos climáticos para su período histórico. Esta diferencia implica que la variabilidad natural del sistema, tal como surge de los datos observados, no es reproducida por los modelos, lo cual tiene impacto directo en la caracterización de los escenarios de cambio climático y, en particular, en la magnitud de las condiciones extremas.

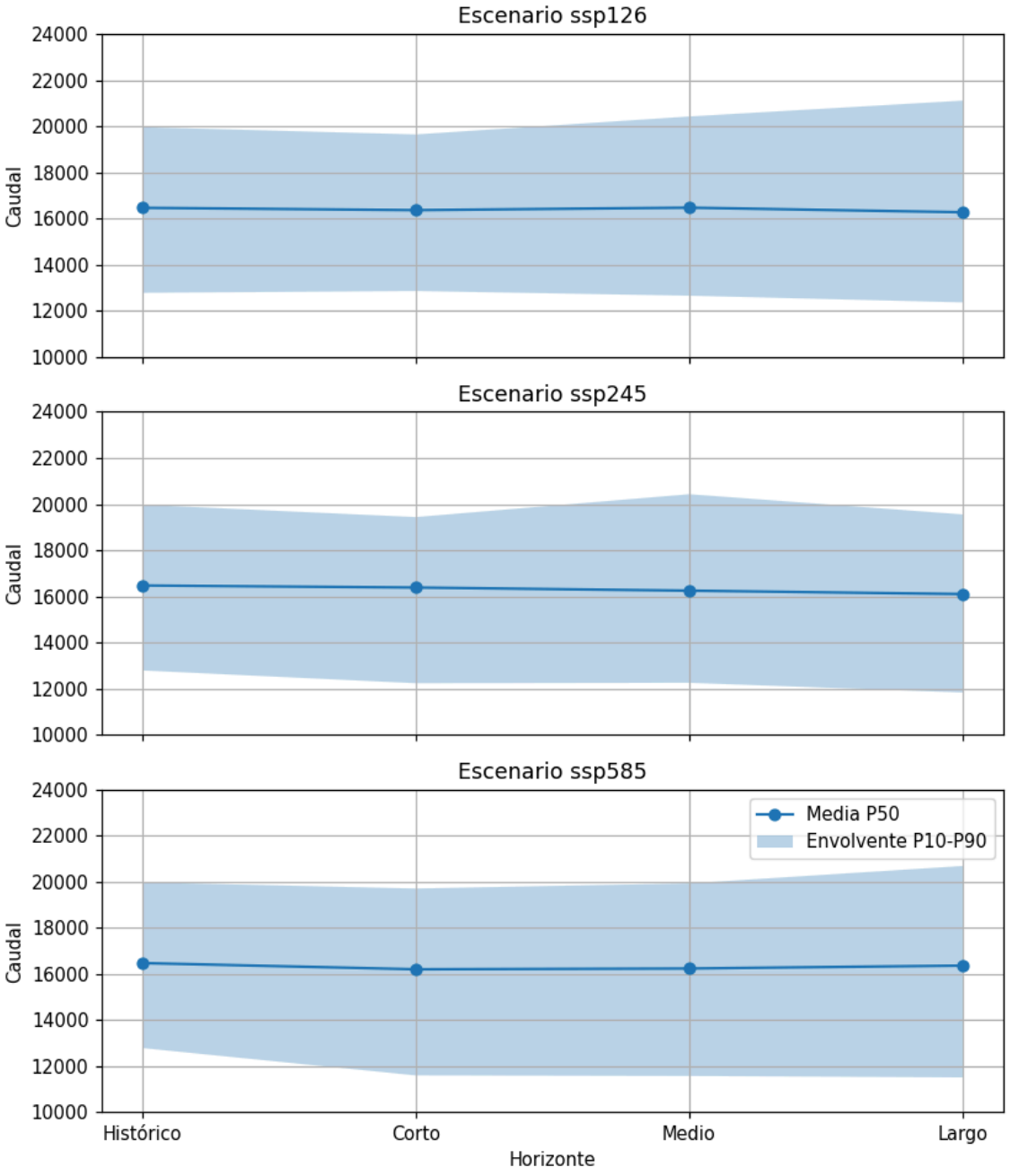


Figura 7. Caudales en Paraná

A modo de ejemplo, se analiza la serie de caudales en la estación Corrientes (Figura 8). Los percentiles obtenidos a partir de datos observados evidencian un rango amplio entre condiciones de aguas bajas y altas. En contraste, los percentiles derivados del período histórico de los modelos climáticos (2005–2015) presentan una dispersión considerablemente menor, con valores más acotados tanto en los extremos inferiores como superiores.

Esta diferencia debe ser tenida en cuenta en la interpretación de resultados, ya que los escenarios construidos a partir de modelos climáticos podrían no capturar completamente la amplitud de las condiciones hidrológicas observadas, particularmente en situaciones de bajantes severas o crecidas extraordinarias.

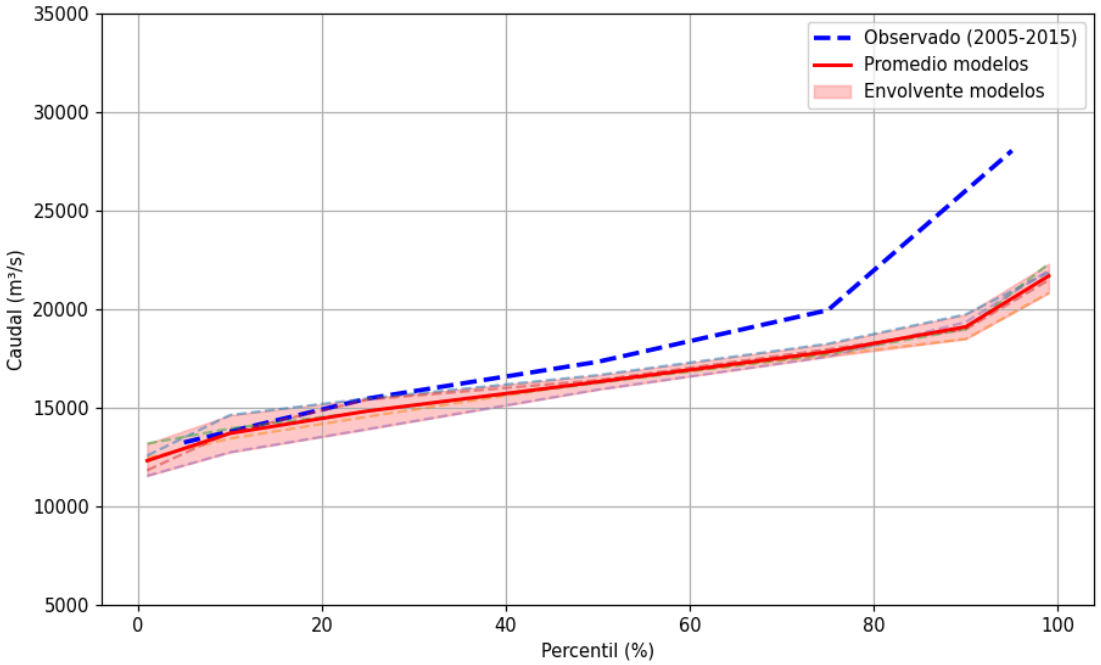


Figura 8. Curva de caudales asociados a distintos percentiles - Corrientes

Este aspecto será tenido en cuenta, manteniendo el análisis a variaciones relativas entre escenarios y horizontes analizados.

4.2.2. Selección de escenarios

A partir de la comparación de los distintos escenarios, se observa que en numerosos casos las condiciones hidrodinámicas resultantes presentan similitudes significativas. En función de ello, se llevó a cabo un análisis orientado a reducir la cantidad de simulaciones necesarias en el modelo 2D de calidad de agua, identificando un conjunto acotado de condiciones de borde representativas. Este enfoque permite optimizar el esfuerzo computacional.

En la Figura 9 se presenta una síntesis de las variaciones porcentuales correspondientes a las envolventes de los percentiles 10 y 90, así como de las condiciones medias asociadas al percentil 50. Todas estas variaciones se encuentran referidas al período histórico de las simulaciones, permitiendo evaluar los cambios relativos bajo los distintos escenarios de cambio climático y horizontes temporales considerados.

Un aspecto relevante en la definición de los escenarios de simulación es la consideración de dos configuraciones morfológicas: por un lado, la batimetría actual del sistema, que permite analizar su influencia sobre la dinámica futura de la calidad de agua; y por otro, una condición de laguna sedimentada, representativa de una evolución geomorfológica a más largo plazo. Esta última únicamente se considera en los escenarios de largo plazo.

Luego, se detallan los criterios empleados para la determinación de los escenarios a simular:

- Para las condiciones medias (percentil 50), que representan situaciones hidrológicas normales, se seleccionaron dos casos de interés para su evaluación en el modelo de detalle.
    - Escenario SSP5-8.5 en el corto plazo, el cual presenta una variación de -1,6% respecto del período histórico y se analiza bajo la batimetría actual.
    - Escenario SSP2-4.5 en el largo plazo, que permite evaluar una variación máxima de -2,3%, incorporando además la condición de batimetría evolucionada.
- En el análisis de condiciones extremas de bajante, se consideró la envolvente mínima del percentil 10. Escenario SSP5-8.5 presenta las mayores variaciones respecto del histórico.
    - Horizonte de mediano plazo se identifica una condición con una disminución de -9,5%, evaluada con la batimetría actual,
    - Horizonte de largo plazo se alcanza una variación de -9,9%, asociada a la condición de laguna sedimentada.
- Para el caso de las envolventes máximas del percentil 90, se identifican situaciones tanto de disminución como de incremento de caudales respecto del período histórico, lo que amplía el espectro de escenarios a considerar.
    - En condiciones de disminución del caudal, se seleccionaron:

- Escenario SSP2-4.5 en el corto plazo, con una variación de -2,7%,
- Escenario SSP2-4.5 en el largo plazo, con una variación de -2,1%.

- Por otro lado, en condiciones de incremento de caudales, se adoptaron como representativos
  - Escenario SSP2-4.5 en el mediano plazo, con un aumento de +2,3%,
  - Escenario SSP1-2.6 en el largo plazo, que presenta el mayor incremento, del orden de +5,7%.



Figura 9. Anomalías de caudales - Paraná

De esta forma se tiene un total de 8 escenarios de clima futuro, considerando 3 condiciones hidrológicas distintas y contemplando cambios morfológicos del sistema a largo plazo. Para cada condición hidrológica además se adicionan los períodos

históricos, que sirven de referencia para poder cuantificar las variaciones porcentuales en parámetros hidráulicos y de calidad de agua.

4.2.3. Condiciones de borde - calidad de agua

En lo referido a las condiciones de borde de calidad de agua, la definición de las concentraciones en los bordes de aguas arriba se basó en el análisis de información provista por Aguas Santafesinas S. A. (ASSA). En el Producto 7: Modelo de detalle de calidad de agua se realizó un relevamiento de antecedentes, junto con la calibración y validación del modelo para cuatro parámetros, los cuales fueron oportunamente consensuados con la prestataria.

Los parámetros podrían agruparse según su origen. Por un lado, los sólidos disueltos totales y los cloruros, cuya presencia se vincula a los aportes provenientes de los Saladillos. Por otro lado, el hierro (Fe) y el manganeso (Mn), que podrían asociarse a los aportes del río Bermejo, especialmente durante sus crecidas anuales (diciembre a mayo), cuando su carga de sedimentos finos —fracción capaz de transportar dichos elementos— es mayor.

A partir de esta diferenciación de fuentes, y considerando la disponibilidad y calidad de los datos medidos, se optó por reducir el análisis a dos parámetros representativos: los SDT, como indicador de la señal asociada a los aportes de los Saladillos, y el Fe, como trazador de la influencia del río Bermejo. Esta simplificación

permite capturar los procesos dominantes manteniendo robustez en la base de datos utilizada.

En la Figura 10 siguiente se presentan las series de concentraciones de SDT junto con los caudales de los ríos Paraná y Bermejo. Para el caso del río Paraná, los caudales fueron considerados a partir de la estación Corrientes, debido a la mayor extensión y confiabilidad de su serie de datos, mientras que para el río Bermejo se utilizaron los registros de la estación Puerto El Colorado.

Asimismo, con el objetivo de representar adecuadamente la relación entre las variables, se incorporó una corrección asociada al traslado de la onda hidrológica. En el caso del Paraná, se introdujo un retardo de 10 días, mientras que para el Bermejo dicho retardo fue determinado mediante la evaluación de distintos desfases temporales, seleccionando aquel que maximiza la correlación con las concentraciones observadas. De este análisis se obtuvo que el tiempo de traslado desde Puerto Colorado hasta Reconquista es del orden de 5 días, mientras que ese mismo pulso hidrológico alcanza la zona de Santa Fe aproximadamente a los 10 días.

Bajo estas consideraciones, se observa que la respuesta hidrológica de ambos cursos presenta comportamientos independientes, y que la variación en las concentraciones de SDT acompaña principalmente la modulación de los caudales del río Paraná.

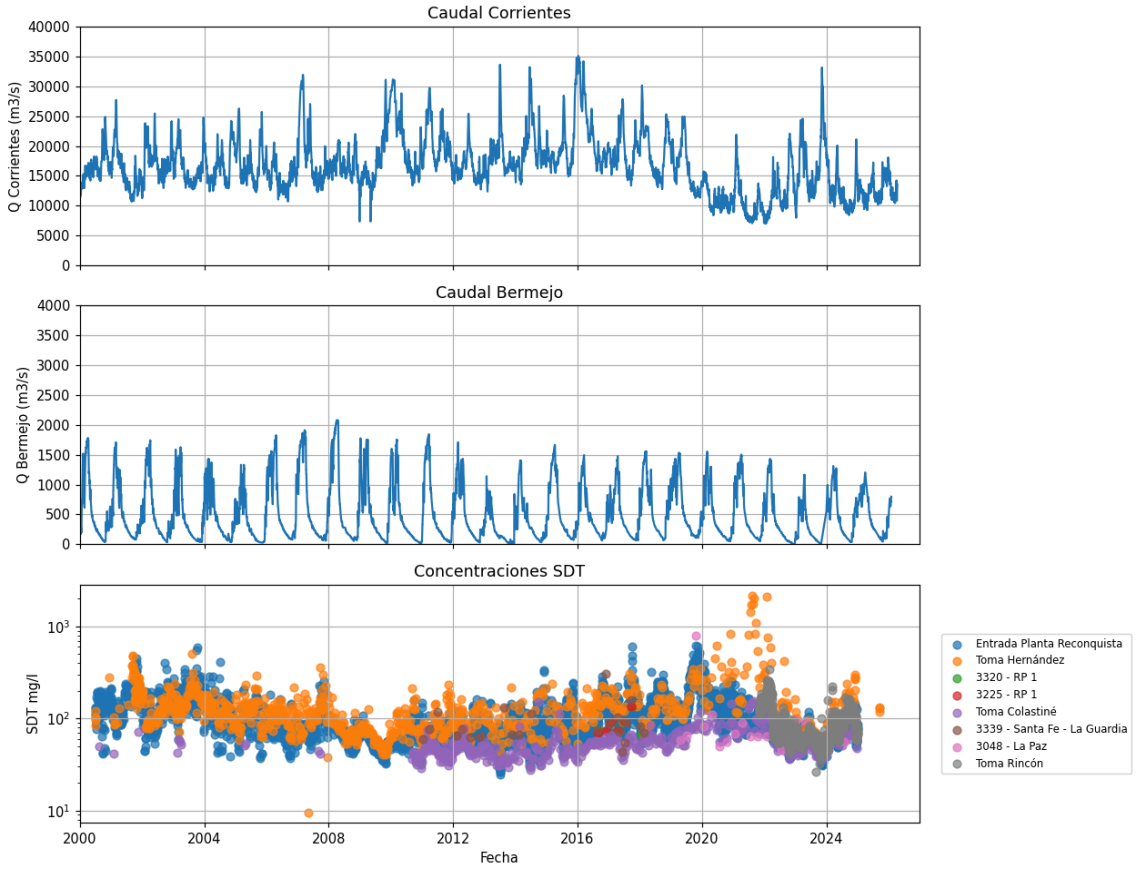


Figura 9. Series de caudales y concentraciones de SDT

Específicamente en la Toma Hernández se observa que la correlación entre los SDT y los caudales del río Paraná es de R = -0,37, lo que indica una relación inversa moderada, donde a menores caudales se registran mayores concentraciones. En cambio, la correlación con los caudales del río Bermejo resulta significativamente menor, alcanzando un valor de R = -0,10, lo que evidencia una débil asociación para este parámetro en dicho punto de control (ver Figura 10).

Asimismo, se destacan valores elevados de concentración asociados a condiciones de bajos caudales. Estos eventos, identificados previamente en la Figura 9, corresponden principalmente al período de bajante extraordinaria 2021–2022. Este comportamiento se vincula con la desvinculación hidráulica del río Paraná respecto del sistema Setúbal, lo que favorece una mayor incidencia relativa de los aportes locales, particularmente de los Saladillos, sobre la calidad de agua en la laguna Setúbal.

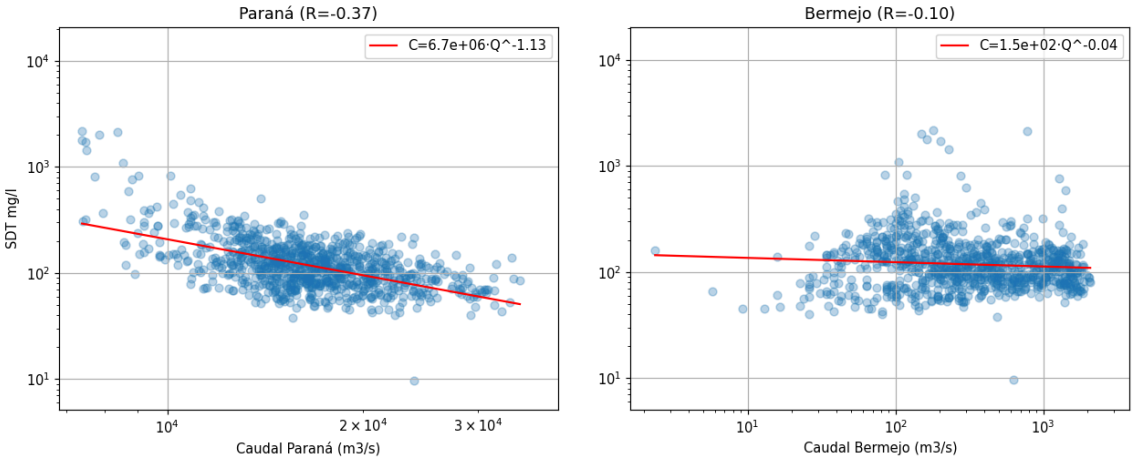


Figura 10. Correlaciones de SDT con el Paraná y Bermejo

Para el conjunto de estaciones con información disponible se realizaron ajustes entre las concentraciones de SDT y los caudales del río Paraná (Figura 11). Entre ellas, las de mayor relevancia para la definición de las condiciones de borde del modelo son Colastiné y Toma Hernández, por su representatividad de los aportes que ingresan al sistema de la laguna Setúbal.

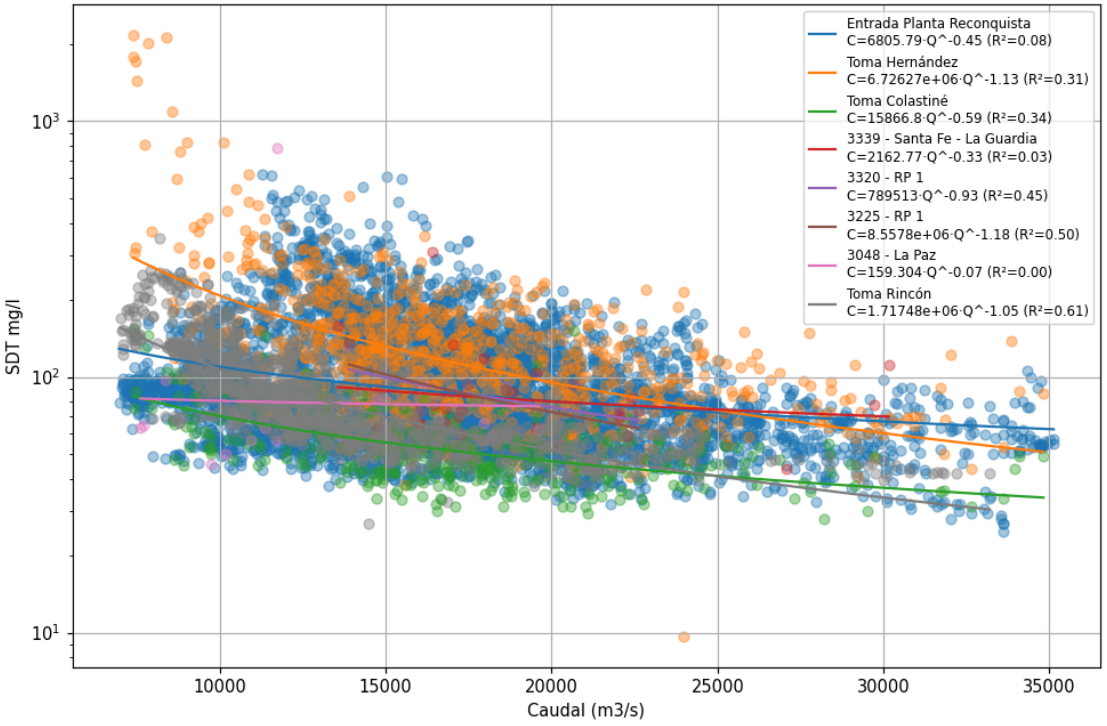


Figura 11. Ajustes de correlaciones - SDT

En particular, la estación Toma Hernández se emplea para inferir la concentración asociada al aporte del arroyo Correntoso, el cual, debido a la influencia del sistema de los Saladillos, presenta niveles de salinidad relativamente más elevados. A tal fin, se utilizaron resultados provenientes del modelo hidrodinámico del sistema Santa Fe, a partir del cual se estimó que el caudal que ingresa por esta rama representa aproximadamente el 33% del total de aportes a la laguna Setúbal en condiciones hidrológicas normales y de crecida, incrementándose hasta valores del orden del 55% durante situaciones de aguas bajas.

Un análisis análogo se realizó para el hierro (Fe), observándose en este caso un comportamiento diferenciado respecto de los SDT (Figura 12). En particular, la señal de este parámetro presenta una correlación más marcada con los caudales del río Bermejo, lo que refleja su origen asociado a los aportes sedimentarios característicos de dicha cuenca.

Se observa que los picos de concentración de hierro coinciden con los períodos de crecida del río Bermejo, evidenciando una relación directa entre el incremento de caudales y el aumento en las concentraciones de este parámetro. Este comportamiento refuerza la hipótesis de que el Bermejo constituye la principal fuente de hierro en el sistema analizado, siendo determinante en la definición de las condiciones de borde para este constituyente.

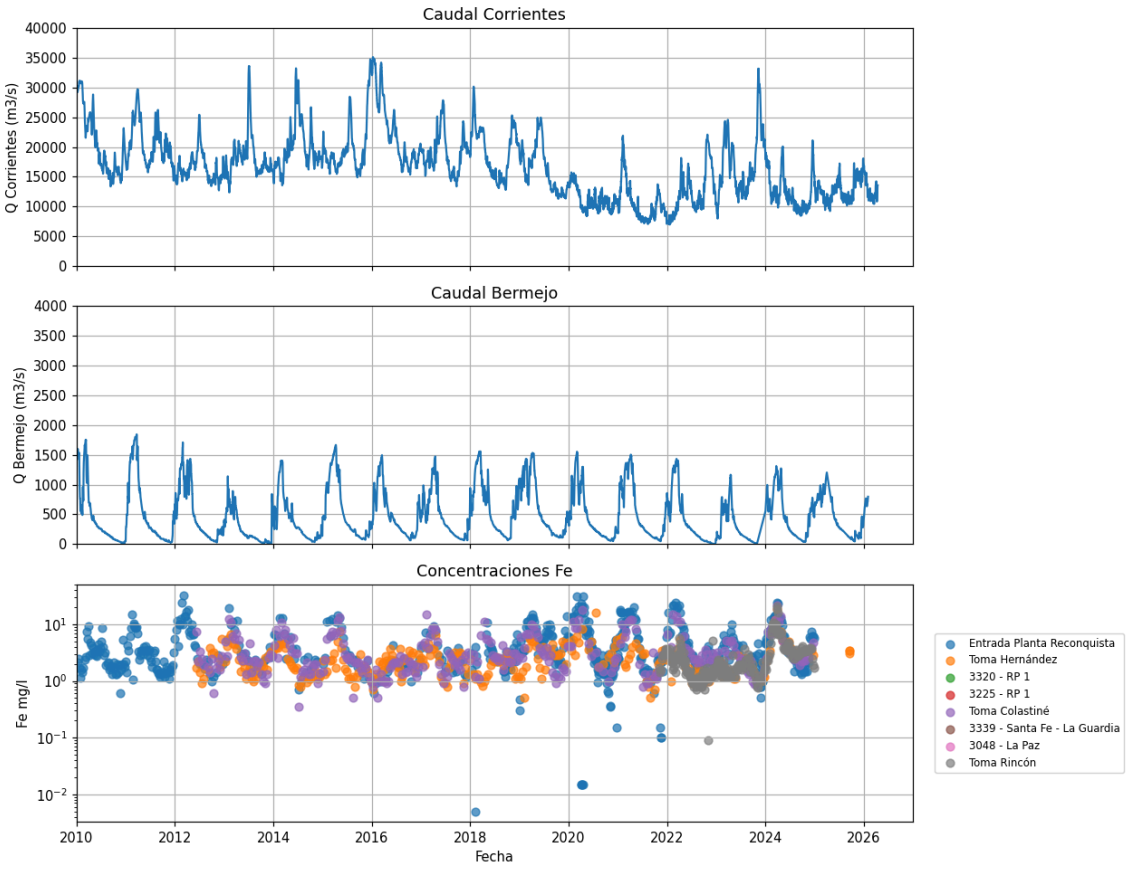


Figura 12. Series de caudales y concentraciones de Fe

Enfocado en la estación Toma Hernández, también se analiza la correlación entre las concentraciones de hierro (Fe) y los caudales de los ríos Paraná y Bermejo. En el caso del río Paraná, se observa una correlación de tipo inverso, lo que indica que durante condiciones de crecida las concentraciones de Fe tienden a disminuir, como consecuencia de un efecto de dilución asociado al mayor volumen de agua circulante (Figura 13).

Por el contrario, para el río Bermejo se evidencia una correlación directa, donde los incrementos de caudal se corresponden con aumentos en las concentraciones de hierro. Este comportamiento refleja el carácter altamente sedimentológico del Bermejo, cuyas crecidas transportan importantes cargas de sedimentos finos a los cuales el hierro se encuentra asociado, generando así los picos de concentración observados en el sistema.

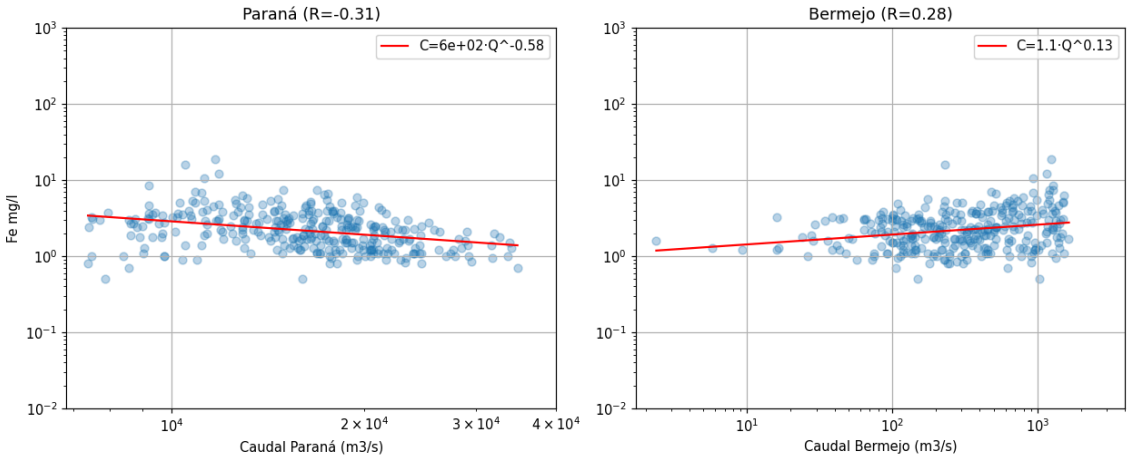


Figura 13. Correlaciones de Fe con el Paraná y Bermejo

Finalmente, la Figura 14 presenta el conjunto de ajustes realizados para las estaciones con datos disponibles de hierro, entre las cuales se destacan, por su relevancia en la definición de las condiciones de borde, las estaciones Colastiné y Toma Hernández.

La estimación de las concentraciones asociadas a los aportes de los Saladillos se complementó mediante un análisis de balance de masa a partir de las concentraciones observadas en Toma Hernández, asumiendo condiciones de mezcla completa. Este enfoque resulta análogo al aplicado para los SDT y permite descomponer las contribuciones relativas de las distintas fuentes, garantizando coherencia entre los distintos parámetros considerados en el modelo.

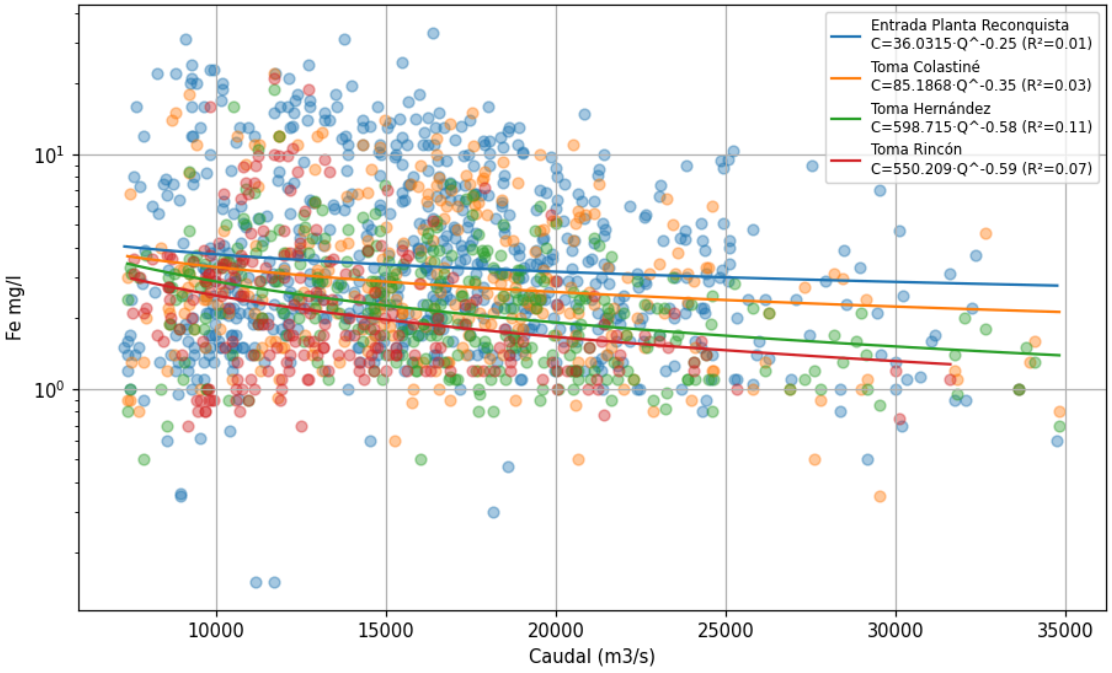


Figura 14. Ajustes de correlaciones - Fe

5. SIMULACIONES DE ESCENARIOS FUTUROS

5.1. Escenarios de referencia

La distribución espacial de SDT para las condiciones históricas muestra un patrón coherente entre los percentiles analizados, con mayores concentraciones en el sector norte del dominio y una disminución progresiva hacia aguas abajo. El escenario histórico correspondiente a una condición de bajante (p10) presenta las concentraciones más elevadas y una mayor extensión, lo que indica condiciones de menor dilución relativa (Figura 15).

En una condición normal del escenario histórico de referencia (p50) se mantiene el patrón general, aunque con una distribución más equilibrada entre clases (Figura 16). En condiciones de crecida (p90), en cambio, se observa una reducción de las zonas con altos valores de SDT y una mayor predominancia de concentraciones bajas e intermedias, sugiriendo una mayor renovación o capacidad de dilución del sistema asociado a mayores caudales (Figura 17). Las concentraciones más elevadas tienden a localizarse preferentemente sobre la margen derecha del riacho Santa Fe.



Figura 15. Distribución espacial de SDT - Escenario histórico bajante (p10).



Figura 16. Distribución espacial de SDT - Escenario histórico normal (p50).



Figura 17. Distribución espacial de SDT - Escenario histórico crecida (p90).

Análogamente, se presentan las condiciones de Fe para el escenario histórico de referencia, que en este caso muestra mayores concentraciones sobre margen izquierda asociada al ingreso de sedimentos desde el Paraná. Se observa una tendencia a la localización de valores elevados sobre la margen derecha del riacho Santa Fe, lo que evidencia una marcada heterogeneidad transversal en el transporte del compuesto. El escenario p10 muestra la condición más crítica (Figura 18), mientras que en condiciones normales y de crecida (Figuras 19 y 20) se mantiene el patrón general, aunque con una reducción relativa de las zonas de máxima concentración y una mayor presencia de valores bajos a intermedios.



Figura 18. Distribución espacial de Fe - Escenario histórico bajante (p10).



Figura 19. Distribución espacial de Fe - Escenario histórico normal (p50).



Figura 20. Distribución espacial de Fe - Escenario histórico crecida (p90).

5.2. Escenarios futuros

Los escenarios futuros serán analizados mediante su comparación con el escenario de referencia, realizando un contraste sistemático de las anomalías obtenidas. El análisis se llevará a cabo de forma desagregada según las distintas condiciones hidrológicas representativas del sistema.

En términos generales, se observa que durante las condiciones de bajante y régimen normal predominan anomalías negativas, indicando una reducción de las variables analizadas respecto del escenario de referencia. En cambio, bajo condiciones de creciente se identifican respuestas más variables, con escenarios en los que se presentan tanto incrementos como disminuciones de caudales en relación con la condición de referencia.

Asimismo, dentro de cada una de las condiciones hidrológicas consideradas, se evaluará específicamente el efecto de la sedimentación en la laguna a largo plazo, con el fin de analizar su influencia sobre la evolución del sistema y su interacción con las respuestas hidrodinámicas y de calidad de agua bajo escenarios futuros.

5.2.1. SDT

5.2.1.1. Bajante

En la Figura 21 se observa que una disminución de caudales en el río Paraná durante una condición de bajante se asocia con un aumento de la concentración de SDT. En

cuanto a su distribución espacial, se aprecia una condición relativamente homogénea en el rango de 5 a 50 mg/L, considerando un horizonte de mediano plazo en el cual la batimetría de la laguna se correspondería aproximadamente con la situación actual.

En la condición de largo plazo, considerando la laguna sedimentada (Figura 22), se observa un comportamiento similar en la zona de la toma. Sin embargo, la mezcla se completa más cerca del puente, lo que permite identificar concentraciones bajas sobre la margen izquierda, las cuales posteriormente se homogenizan durante la transición hacia la sección de contracción. La disminución de caudal acentúan la influencia de los aportes que se mezclan con el caudal de los Saladillos sobre margen derecha.

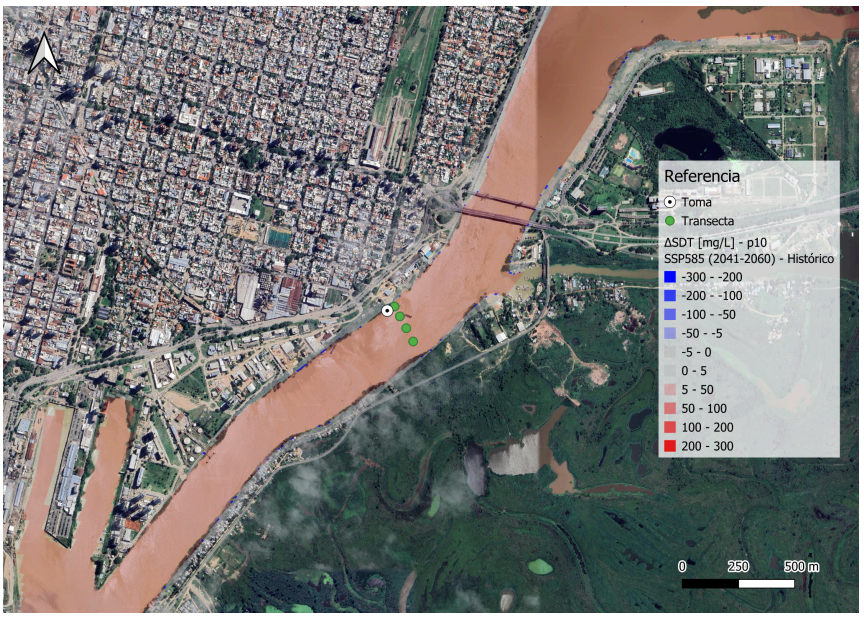


Figura 21. Diferencia de concentración de SDT. SSP585 (Mediano Plazo) - bajante.

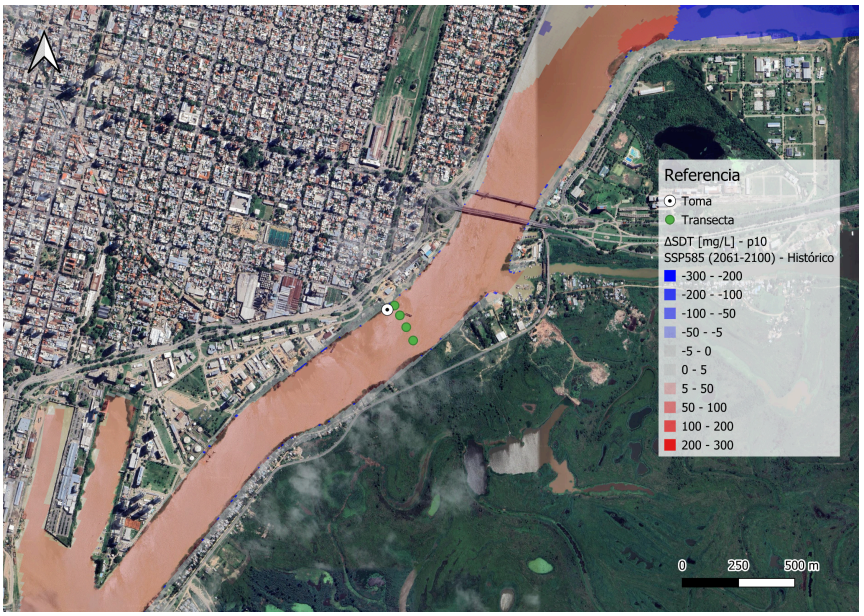


Figura 22. Diferencia de concentración de SDT. SSP585 (Largo Plazo) - bajante.

5.2.1.2. Normal

En una condición hidrológica normal, el comportamiento es similar al observado en bajante, ya que ante anomalías decrecientes, en el mediano plazo, se registra un aumento de las concentraciones (Figura 23). Sin embargo, a largo plazo, la modificación de la batimetría de la laguna adquiere un rol más significativo, limitando la mezcla completa. Esto genera un efecto inverso en la distribución espacial, con una disminución de las concentraciones sobre la margen derecha y un incremento sobre la margen izquierda (Figura 24).

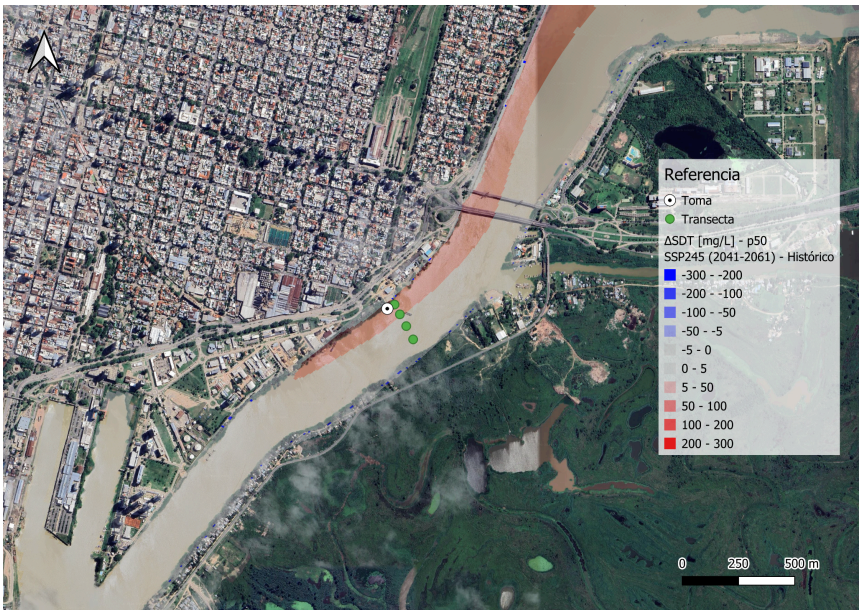


Figura 23. Diferencia de concentración de SDT. SSP245 (Mediano Plazo) - normal.

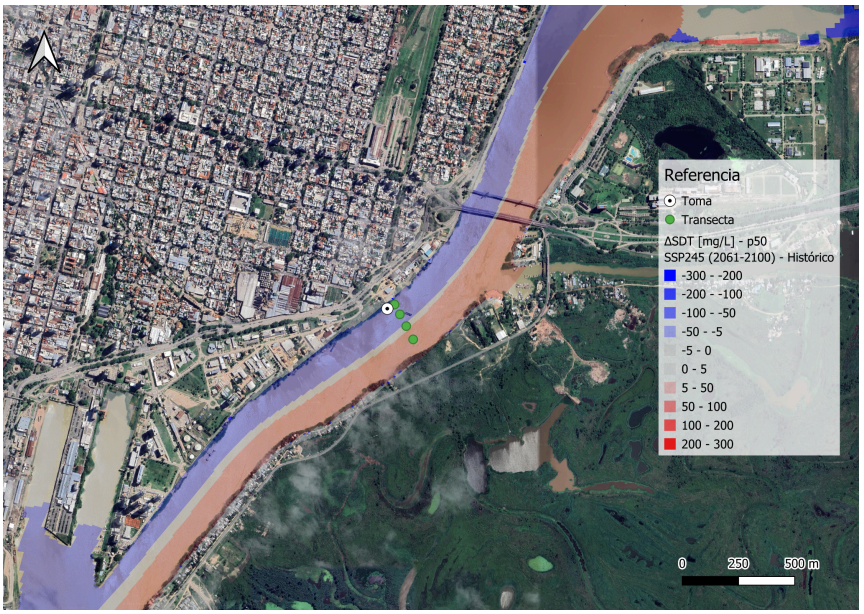


Figura 24. Diferencia de concentración de SDT. SSP245 (2061-2100) - normal.

5.2.1.3. Crecida

En condiciones de crecida se analizan dos situaciones, dado que las anomalías pueden resultar tanto positivas como negativas según el escenario considerado. En primer lugar, se evalúa el caso en el que los caudales son menores que los del período de referencia. La Figura 25 muestra un comportamiento análogo al observado para las otras condiciones hidrológicas bajo la batimetría actual. Por su parte, en el largo plazo, considerando la laguna sedimentada, el efecto replica lo observado en la condición normal, donde la mezcla resulta incompleta (Figura 26).

Por otra parte, cuando la anomalía es positiva y los caudales aumentan respecto de la condición de referencia, la Figura 27 muestra una disminución de la concentración para la batimetría actual. En el escenario de largo plazo, aun cuando la mezcla no se completa, las concentraciones también disminuyen (Figura 28).

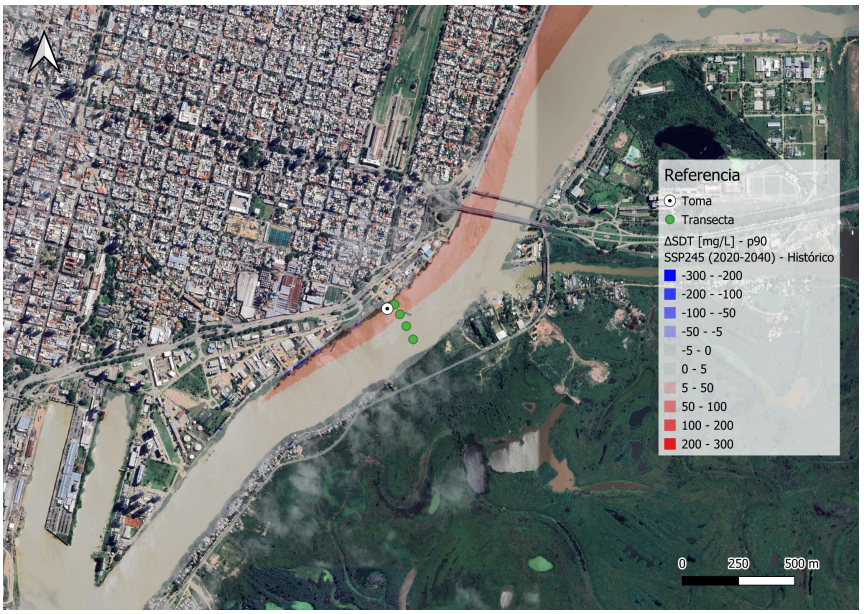


Figura 25. Diferencia de concentración de SDT. SSP245 (Corto Plazo) - crecida (-)

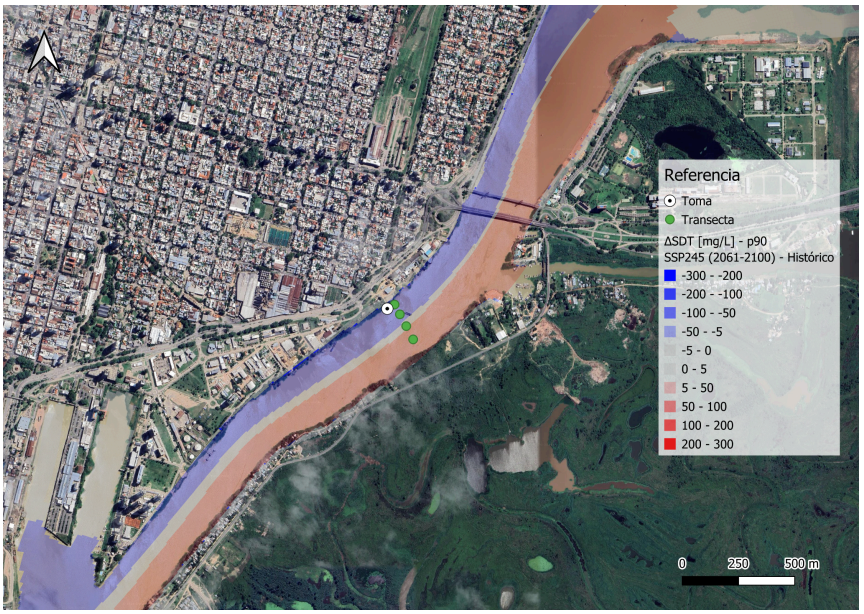


Figura 26. Diferencia de concentración de SDT. SSP245 (2061-2100) - crecida (-)

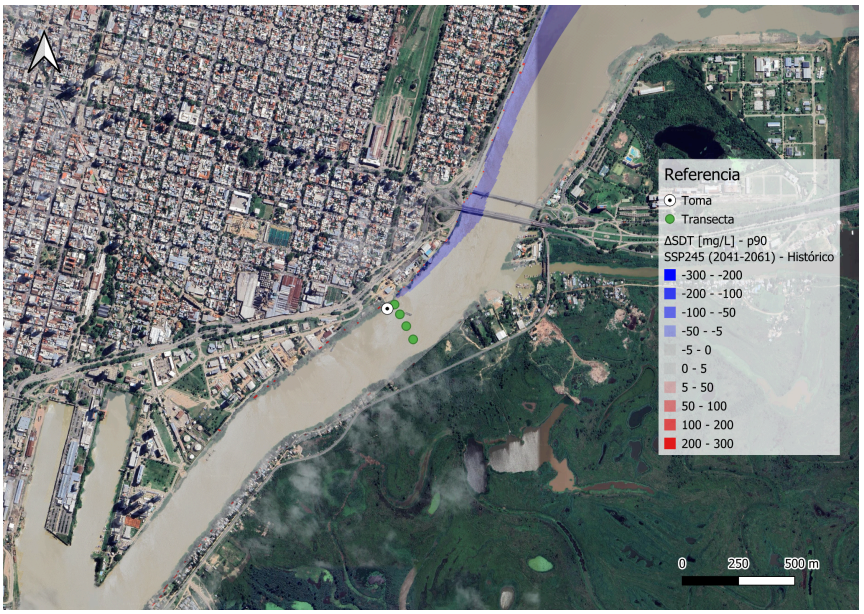


Figura 27. Diferencia de concentración de SDT. SSP245 (2040-2061) - crecida (+)

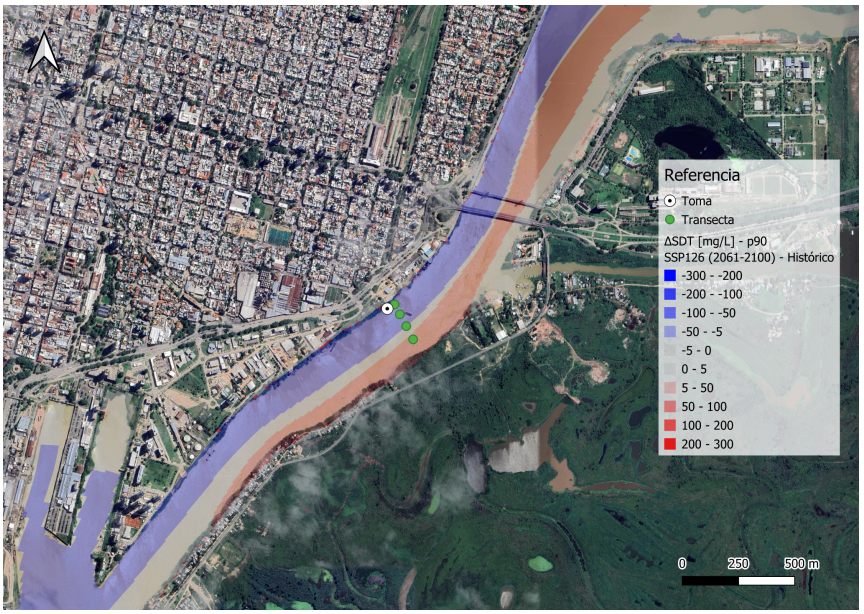


Figura 28. Diferencia de concentración de SDT. SSP126 (2061-2100) - crecida (+)

5.2.2. Fe

5.2.2.1. Bajante

Para el hierro, en condición hidrológica de bajante, una anomalía negativa genera una disminución de las concentraciones (Figura 29). Sin embargo, en el escenario de largo plazo, el efecto de mezcla incompleta vuelve a manifestarse, favoreciendo un incremento de las concentraciones sobre la margen derecha (Figura 30).

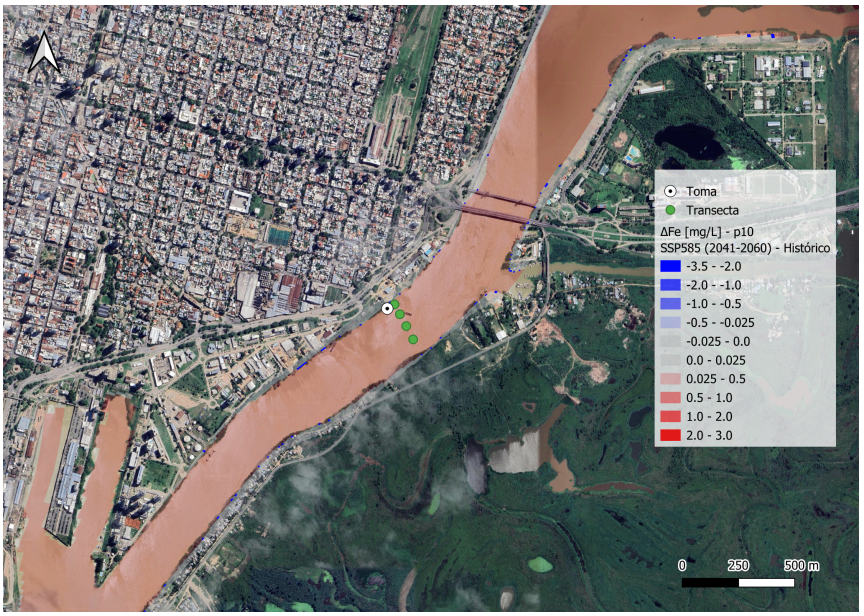


Figura 29. Diferencia de concentración de Fe. SSP585 (2041-2060) - bajante.

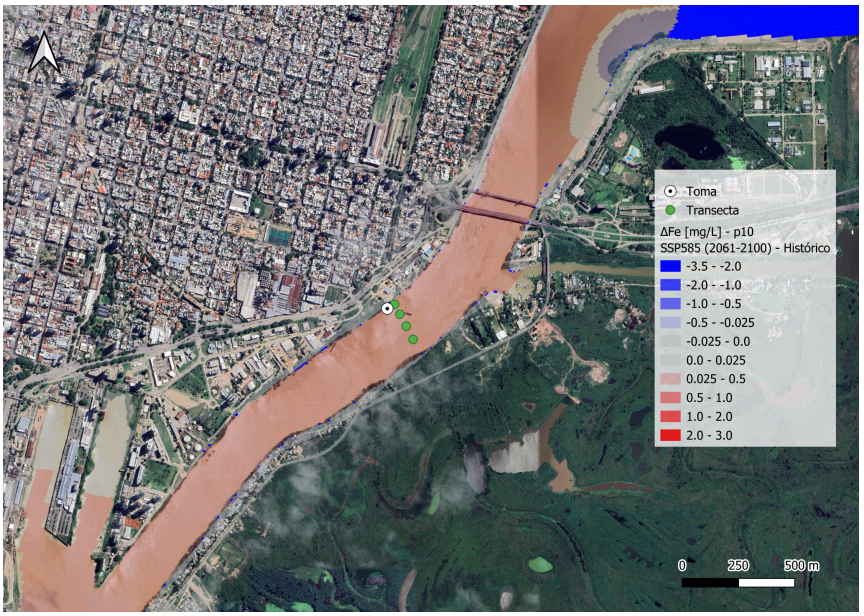


Figura 30. Diferencia de concentración de Fe. SSP585 (2061-2100) - bajante

5.2.2.2. Normal

En condición hidrológica normal, tanto para el mediano como para el largo plazo, se observa un incremento de las concentraciones (Figura 31). No obstante, en el escenario de largo plazo (Figura 32), se intensifica el gradiente transversal de concentración, con aumentos sobre la margen derecha y disminuciones sobre la margen izquierda.

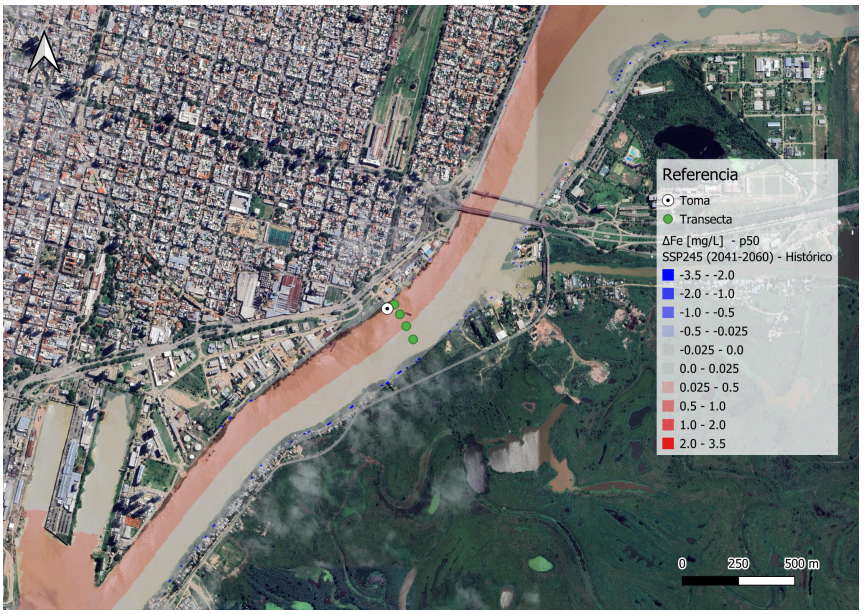


Figura 31. Diferencia de concentración de Fe. SSP245 (2041-2060) - normal

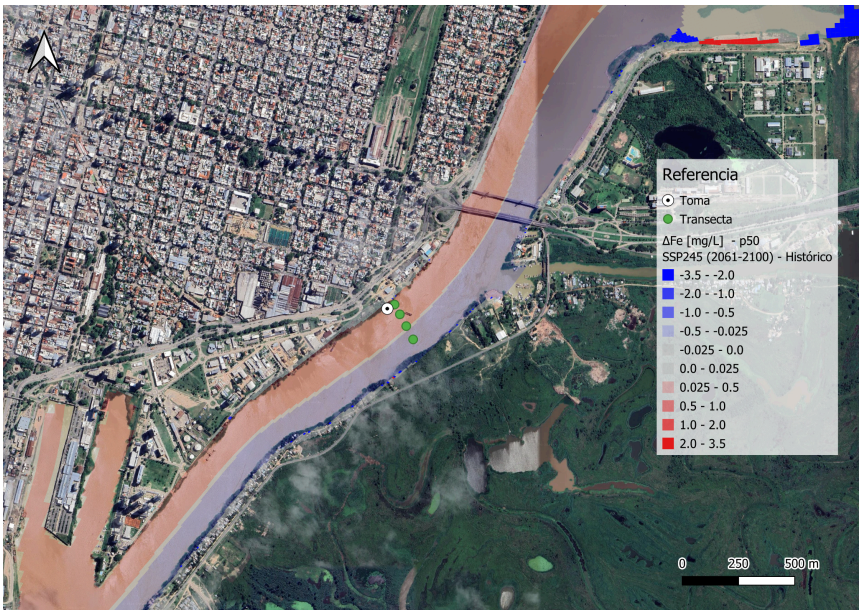


Figura 32. Diferencia de concentración de Fe. SSP245 (2061-2100) - normal

5.2.2.3. Crecida

Por último, en condición de crecida, cuando la anomalía es negativa, las concentraciones aumentan en ambos casos (Figura 33), con la diferencia de que en el largo plazo la mezcla no se completa (Figura 34).

De manera opuesta, ante anomalías positivas, las concentraciones disminuyen en ambas situaciones, aunque con un mayor gradiente transversal en la condición con la laguna sedimentada (Figura 36).

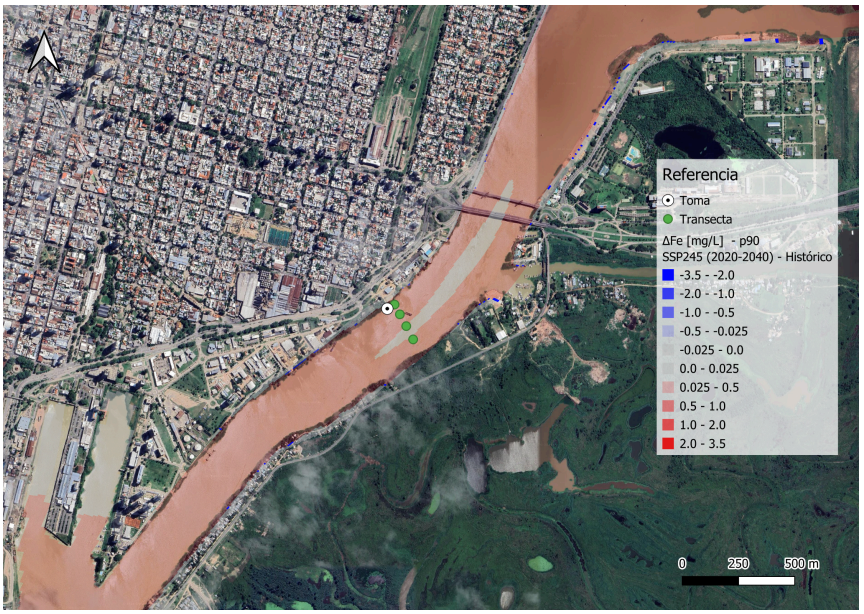


Figura 33. Diferencia de concentración de Fe. SSP245 (2020-2040) - crecida (-)

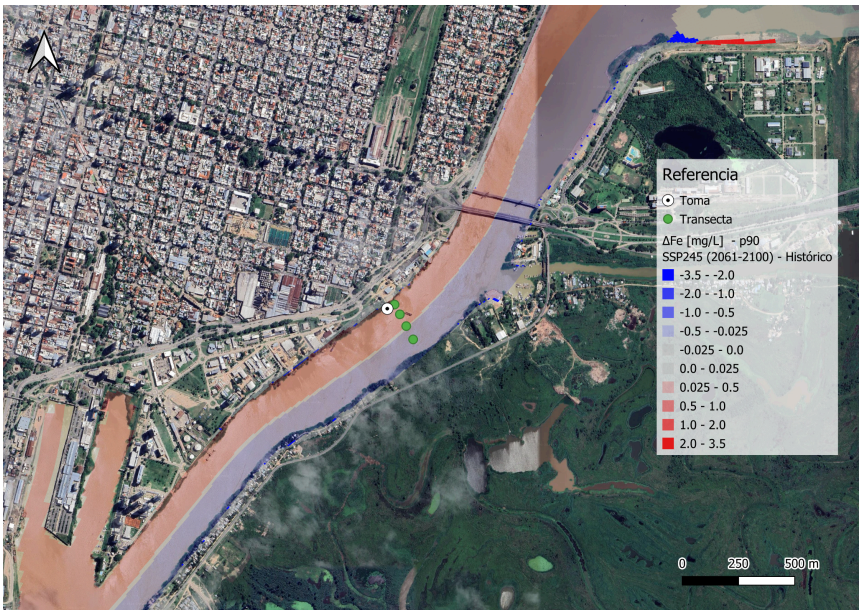


Figura 34. Diferencia de concentración de Fe. SSP245 (2061-2100) - crecida (-)

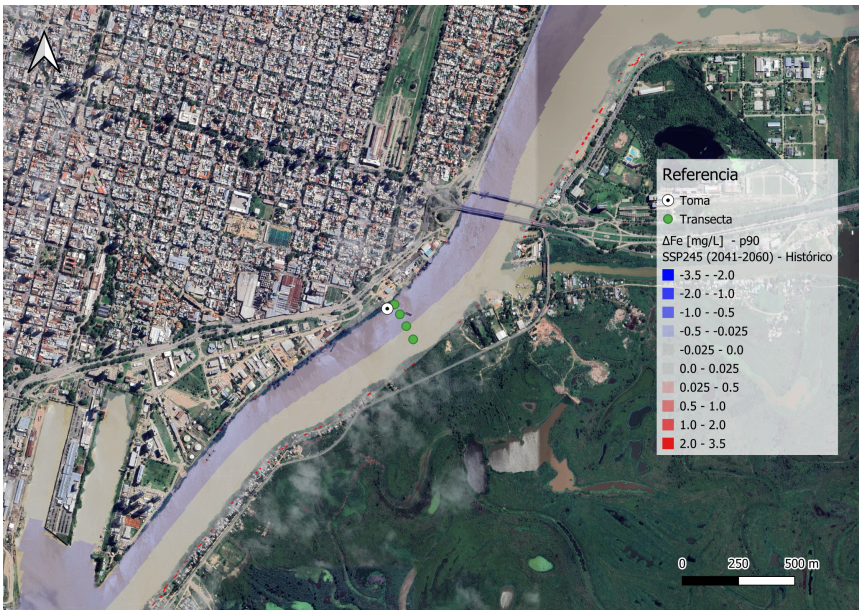


Figura 35. Diferencia de concentración de Fe. SSP245 (2041-2060) - crecida (+)

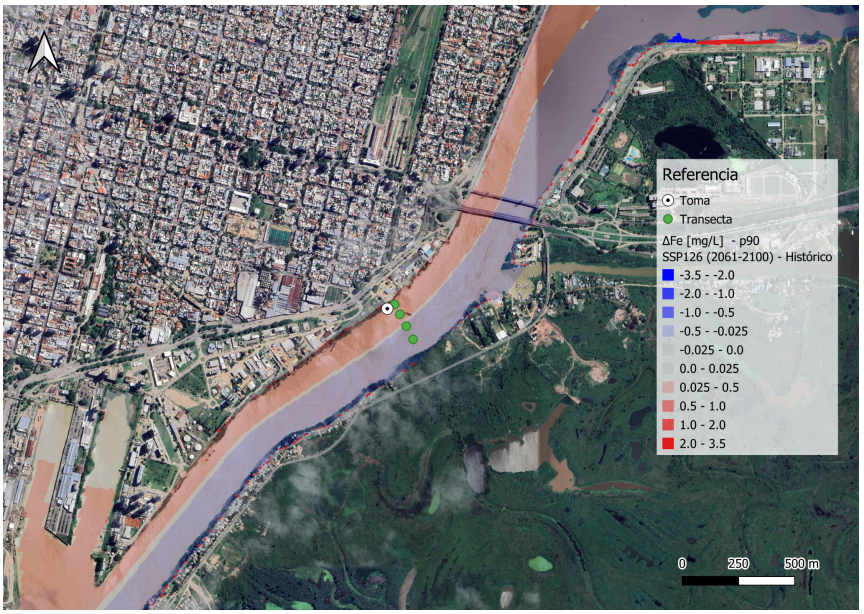


Figura 36. Diferencia de concentración de Fe. SSP126 (2061-2100) - crecida (+)

5.2.3. Análisis en la Toma

Para un análisis más focalizado en la toma, se evalúan los resultados sobre la transecta coincidente con la ubicación de captación, considerando los mismos puntos donde se realizó el muestreo de septiembre de 2025, detallado en el Producto 4 (Campaña de calidad de agua – Toma Hernández), presentado en la Figura 37. En dicha instancia, el modelo de calidad de agua ha sido validado, tal como se desarrollará en el Producto 7 (Modelo de detalle).



Figura 37. Distribución espacial de puntos de muestreo utilizados para calibrar el módulo de calidad de agua.

En este contexto, la Figura 38 presenta los resultados en cuatro puntos de la transecta, siendo T4 (20) el más próximo a la toma. Los resultados corresponden a valores de concentración de SDT para distintos períodos históricos, asociados a diferentes condiciones hidrológicas, así como para los escenarios futuros evaluados previamente. Se observa que las mayores concentraciones se registran principalmente hacia la margen derecha en T4(20) y T4(40), con valores cercanos a 150–185 mg/l y máximos próximos a 200 mg/l, mientras que hacia la margen izquierda, en T4(60) y especialmente T4(80) se observa una mayor variabilidad y una reducción de las concentraciones en varios escenarios .

Las condiciones de bajante presentan la menor variabilidad transversal. Asimismo, en todos los casos, los menores caudales asociados a anomalías negativas generan mayores concentraciones a lo largo de la transecta.

Para condiciones normales y de crecida, el gradiente transversal entre márgenes se vuelve más evidente. Asimismo, la evaluación de los escenarios respecto de la condición de referencia no resulta directa, ya que la concentración varía en función del horizonte considerado (con o sin sedimentación en la laguna) y del signo de la anomalía; en particular, bajo condiciones de crecida se presentan tanto anomalías positivas como negativas.

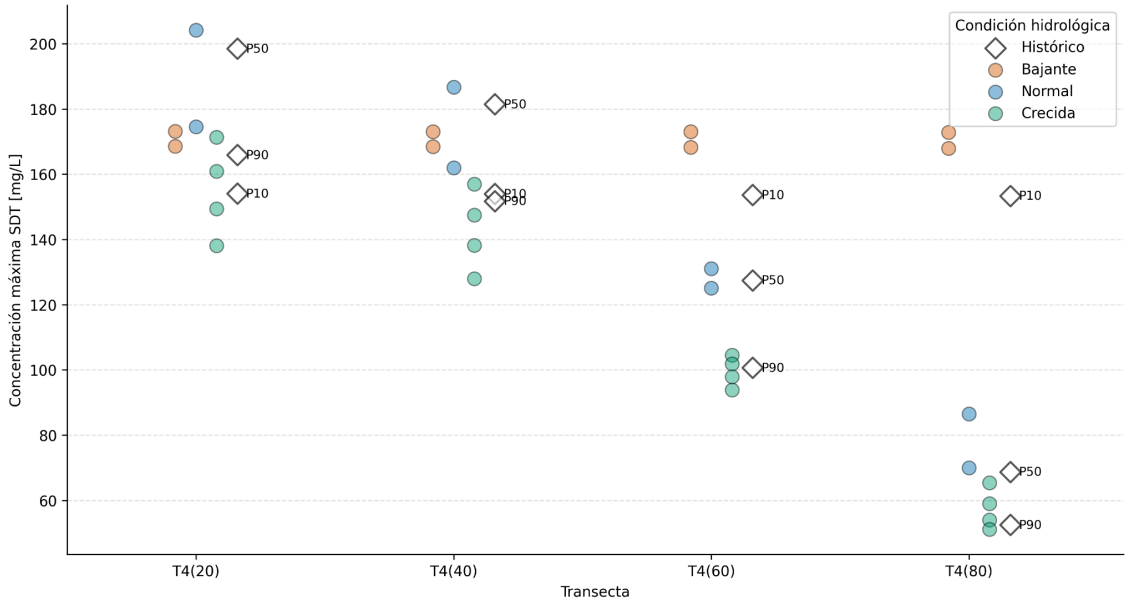


Figura 38. Concentraciones máximas de SDT en diferentes escenarios hidrológicos en torno a la transecta de evaluación.

En el caso del FE, se presentan resultados análogos. La principal diferencia respecto de los SDT es el gradiente transversal de concentraciones para una condición hidrológica normal y de crecida. En la Figura 39 se observa que las concentraciones tienden a concentrarse hacia la margen izquierda en la sección T4(80), con valores mayormente entre 2,4 y 2,7 mg/l, mientras que las secciones T4(20) y T4(40) presentan una dispersión más amplia (Figura 39). Estos resultados evidencian una heterogeneidad transversal relevante en el entorno de la Toma Hernández.

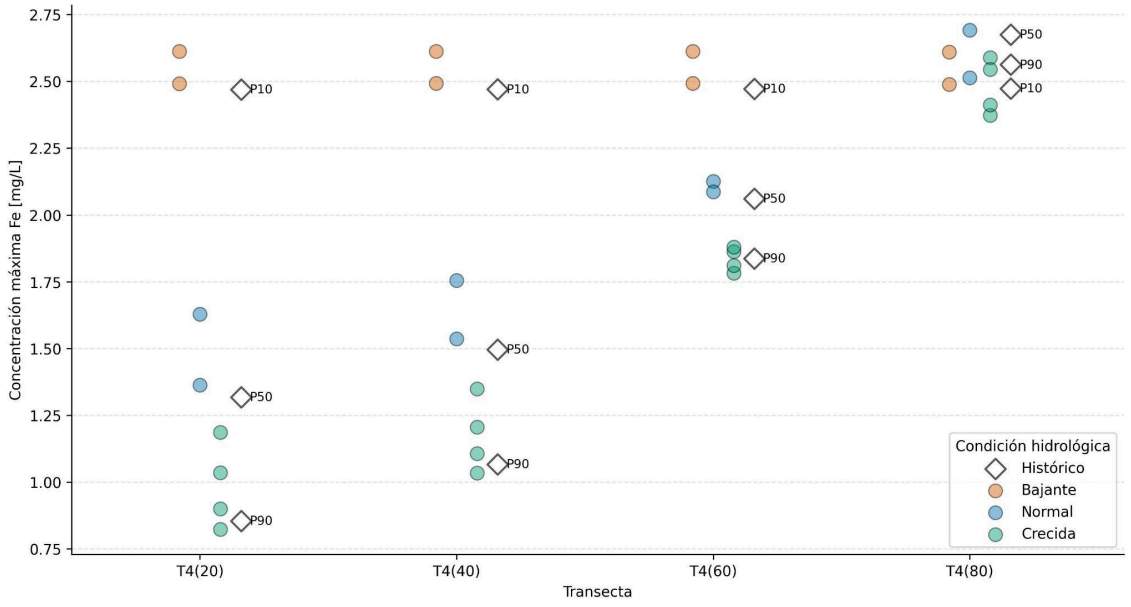


Figura 39. Concentraciones máximas de Fe en diferentes escenarios hidrológicos en torno a la transecta de evaluación.

Las Figuras 40 y 41 presentan un mayor nivel de detalle de estos resultados, mostrando las concentraciones máximas puntuales en el punto más cercano a la

toma. La dispersión de concentraciones máximas evidencia diferencias entre los escenarios analizados. En el caso de SDT, la mayor parte de los valores se concentra entre 160 y 175 mg/l, con escenarios puntuales que superan los 195 mg/l (Figura 40). Para el Fe, los valores se ubican mayormente entre 0,8 y 1,6 mg/l, aunque algunos escenarios alcanzan concentraciones próximas a 2,5–2,6 mg/l (Figura 41). En conjunto, los resultados indican que la toma presenta una respuesta variable según la condición hidrológica y climática simulada, con escenarios específicos que pueden generar aumentos relevantes en las concentraciones máximas.

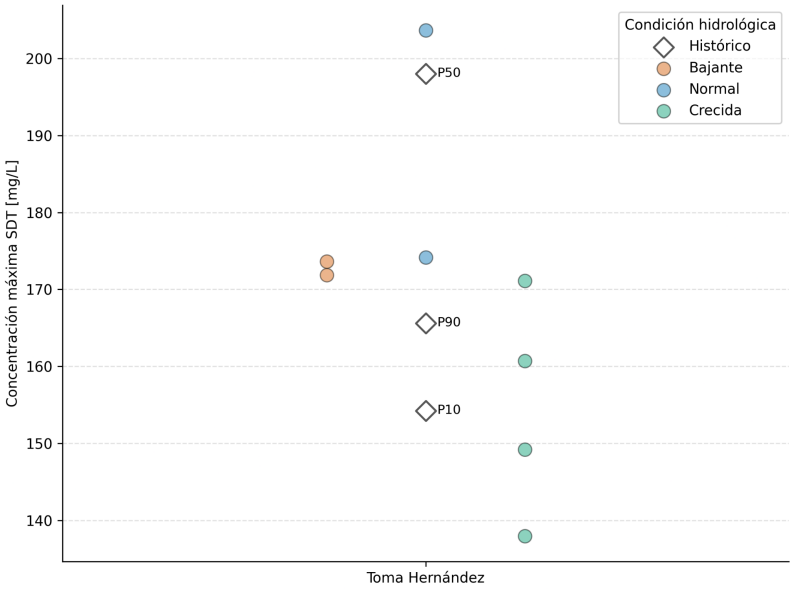


Figura 40. SDT en diferentes escenarios hidrológicos en torno a la Toma Hernández.

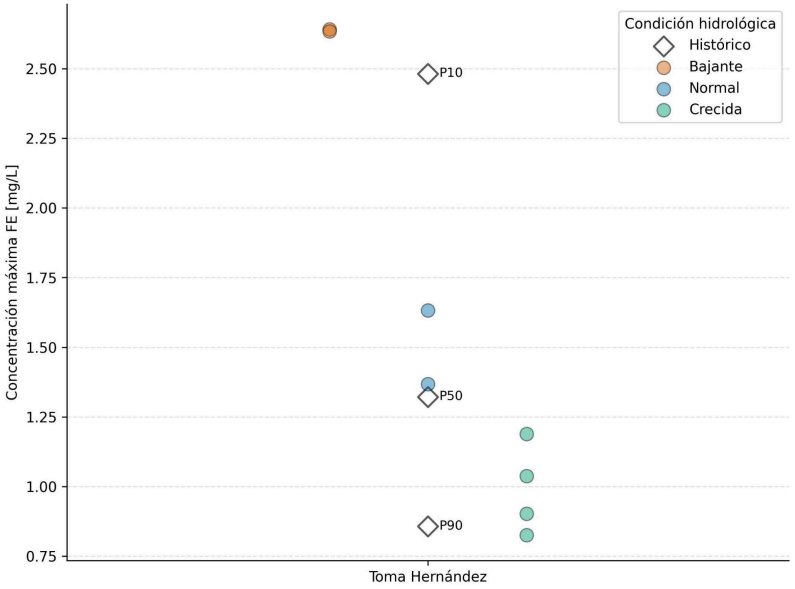


Figura 41. Fe en diferentes escenarios hidrológicos en torno a la Toma Hernández.

6. ACLARACIÓN

Las concentraciones de las variables de calidad de agua obtenidas para los distintos escenarios de cambio climático deben interpretarse principalmente en términos de anomalías respecto de la condición de referencia, más que como valores absolutos.

Las concentraciones absolutas simuladas dependen de las características del esquema de modelación climático-hidrológico-hidráulico empleado, incluyendo la representación de la hidrodinámica, la discretización espacial, las condiciones de borde, la parametrización de los procesos físicos, y las hipótesis adoptadas durante la calibración del modelo. En consecuencia, los valores absolutos pueden estar

influenciados por sesgos propios de la cadena de modelación y no deben interpretarse como una predicción directa de las concentraciones futuras.

Por este motivo, se recomienda utilizar como principal producto las anomalías de concentración (incrementos o disminuciones respecto del escenario de referencia), ya que representan de manera más robusta la respuesta relativa del sistema frente a los distintos escenarios de cambio climático.

Cuando sea necesario estimar concentraciones absolutas futuras, se recomienda aplicar las anomalías obtenidas a partir del modelo sobre valores de referencia representativos de las condiciones actuales (observaciones o simulaciones de referencia adecuadamente validadas), preservando así la consistencia con las condiciones locales y reduciendo la influencia de los sesgos inherentes al esquema de modelación.

7. CONCLUSIONES

- A partir del modelo de calidad de agua calibrado y validado en detalle para la Toma Hernández, se evaluaron distintos escenarios hidrológicos con el objetivo de analizar la respuesta del sistema bajo diferentes condiciones forzantes.
- La evaluación de estos escenarios incorporó, además, consideraciones morfológicas y sedimentológicas de la laguna, reconociendo su influencia en

los procesos de mezcla y transporte de constituyentes.

- La selección de los escenarios hidrológicos se realizó buscando las máximas anomalías para condiciones de bajante, normal y crecida. Como resultado, se obtuvieron anomalías negativas para las condiciones de bajante y normal, mientras que en condiciones de crecida se consideraron tanto anomalías positivas como negativas.

- Se observó que, en términos generales, el rango de variación de caudales derivado de la modelación de escenarios futuros mediante modelos hidrológicos e hidrodinámicos es menor que el registrado en la serie histórica, lo cual constituye un aspecto relevante a tener en cuenta en futuros análisis.

- A partir de los escenarios hidrológicos, se ajustaron las concentraciones de parámetros fisicoquímicos, focalizando el análisis en SDT y Fe, por ser representativos de las principales fuentes: los aportes del río Saladillo para las sales, y del río Bermejo para Fe y Mn.

- Las correlaciones no se realizaron directamente con los aportes de estos tributarios, sino con los caudales del río Paraná, debido a la mayor extensión y confiabilidad de su serie de datos, así como a su rol como principal forzante del sistema. Este criterio constituye otro aspecto a considerar en análisis futuros.

- Los resultados obtenidos evidencian una marcada influencia tanto de la condición hidrológica como de la morfología. Esta última adquiere mayor relevancia en escenarios de condiciones normales y de crecida, donde en

algunos casos se ve limitada la mezcla completa, dando lugar a una distribución menos homogénea de concentraciones en la transecta de la toma.

- Los resultados del período de referencia muestran que las concentraciones máximas de SDT y Fe en el entorno de la Toma Hernández presentan una marcada variabilidad espacial, asociada principalmente a la condición hidrológica y a la distribución transversal del flujo. Para los SDT, las mayores concentraciones se registran hacia la margen derecha, mientras que para el Fe el gradiente se invierte en condiciones normales y de crecida, con mayores valores hacia la margen izquierda. En ambos casos, las condiciones de bajante tienden a presentar una menor variabilidad transversal, mientras que las diferencias entre escenarios reflejan la influencia conjunta de la hidrodinámica y de los procesos de transporte y mezcla representados por el modelo.

8. REFERENCIAS

Dominguez Ruben, L., Szupiany, R., Ramonell, C. y García M. (2023), Hydro-geomorphological and sedimentological processes along the major fluvial-lacustrine delta of the Paraná River (Argentina): Their role in floodplain construction, Earth Surface Processes and Landforms, DOI: 10.1002/esp.5570.

Li, Z. y García, M.H. (2021), pyRiverBed: A Python framework to generate synthetic riverbed topography for constant-width meandering rivers, Computers & Geosciences, https://doi.org/10.1016/j.cageo.2021.104755.

Ramonell, C.G. (2021), Geomorfología y morfodinámica de la planicie aluvial del río Paraná en su tramo medio. Tesis Doctoral. La Plata, Argentina: Facultad de Ciencias Naturales y Museo. Universidad Nacional de La Plata.

CONVENIO UNL-ENERFE (2022), Asistencia técnica al proyecto gasoducto metropolitano para el cruce de la laguna Setúbal. https://www.santafe.gob.ar/ms/enerfe/gasoducto-metropolitano/cruce-de-la-laguna-setubal/.

Pekel, J.F., Cottam, A., Gorelick, N. & Belward, A.S., (2016), High-resolution mapping of global surface water and its long-term changes. Nature, 540, 418–422. https://doi.org/10.1038/nature20584.

QGIS Geographic Information System (2009), QGIS Development Team, Open Source Geospatial Foundation, http://qgis.org.