



BID

Banco Interamericano
de Desarrollo

HydroBID Flood como herramienta de planificación del saneamiento urbano:

El modelaje numérico de pluma de
contaminantes como apoyo al diseño de
plantas de tratamiento en Paraguay

División de Agua y Saneamiento

NOTA TÉCNICA N°
IDB-TN-2439

Autores:

Mauro Nalesso

Eduardo Bogado

José Francisco Manjarres

Federico Monte Domecq

Febrero 2022

HydroBID Flood como herramienta de planificación del saneamiento urbano:

El modelaje numérico de pluma de contaminantes como apoyo al diseño de plantas de tratamiento en Paraguay

Autores:

Mauro Nalesso

Eduardo Bogado

José Francisco Manjarres

Federico Monte Domecq

**Catalogación en la fuente proporcionada por la
Biblioteca Felipe Herrera del
Banco Interamericano de Desarrollo**

HydroBID Flood como herramienta de planificación del saneamiento urbano: el modelaje numérico de pluma de contaminantes como apoyo al diseño de plantas de tratamiento en Paraguay / Mauro Nalesso, Eduardo Bogado, José Francisco Manjarres, Federico Monte Domecq.

p. cm. — (Nota técnica del BID ; 2439)

1. Water resources development-Paraguay-Databases. 2. Watershed management-Paraguay-Computer simulation. 3. Water-supply-Environmental aspects-Paraguay-Computer simulation. 4. Sewage disposal-Environmental aspects-Paraguay. I. Nalesso, Mauro. II. Bogado, Eduardo. III. Manjarrés, José. IV. Monte, Federico. V. Banco Interamericano de Desarrollo. División de Agua y Saneamiento. VI. Serie. IDB-TN-2439

Palabras clave: Calidad de aguas, HydroBID Flood, Modelos numéricos, Saneamiento, Resiliencia, Innovación

Códigos JEL: Q01, Q25, Q54, Q55, Q52, O54, O33, C63

<http://www.iadb.org>

Copyright © [2022] Banco Interamericano de Desarrollo. Esta obra se encuentra sujeta a una licencia Creative Commons IGO 3.0 Reconocimiento-NoComercial-SinObrasDerivadas (CC-IGO 3.0 BY-NC-ND) (<http://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/3.0/igo/legalcode>) y puede ser reproducida para cualquier uso no-comercial otorgando el reconocimiento respectivo al BID. No se permiten obras derivadas.

Cualquier disputa relacionada con el uso de las obras del BID que no pueda resolverse amistosamente se someterá a arbitraje de conformidad con las reglas de la CNUDMI (UNCITRAL). El uso del nombre del BID para cualquier fin distinto al reconocimiento respectivo y el uso del logotipo del BID, no están autorizados por esta licencia CC-IGO y requieren de un acuerdo de licencia adicional.

Note que el enlace URL incluye términos y condiciones adicionales de esta licencia.

Las opiniones expresadas en esta publicación son de los autores y no necesariamente reflejan el punto de vista del Banco Interamericano de Desarrollo, de su Directorio Ejecutivo ni de los países que representa.





BID

Banco Interamericano
de Desarrollo

HydroBID Flood como herramienta de planificación del saneamiento urbano:

El modelaje numérico de pluma de contaminantes como
apoyo al diseño de plantas de tratamiento en Paraguay.

Autores:

Mauro Nalesso.
Eduardo Bogado.
José Francisco Manjarres.
Federico Monte Domecq.

TABLA DE CONTENIDO

I	Índice de Tablas	2	
	Índice de Figuras	5	
	Prólogo	11	
	Agradecimientos	13	
	Introducción y Antecedentes	14	
D	Desafíos en el proceso de planificación del saneamiento urbano: Caso Paraguay	14	
	SIMULACIONES PARA VERIFICACIÓN DE LAS DESCARGAS DE EMISARIOS CON HYDROBID FLOOD	23	
	HydroBID Flood	23	
	Datos Básicos	24	
	Modelo de Transporte de Solutos	25	
1	CASOS DE ESTUDIO	26	
	1. PTAR CIUDAD DEL ESTE	27	
	1.1. Área de estudio y topografía	28	
	1.2. Datos y elementos de diseño	31	
	1.3. Aplicación de HydroBID Flood	33	
	1.4. Análisis de los resultados	49	
	2	2. PTAR LAMBARÉ	51
		2.1. Área de estudio y topografía	52
		2.2. Datos y elementos de diseño	54
		2.3. Aplicación de HydroBID Flood	56
	2.4. Análisis de los resultados	105	
C	Conclusiones y Recomendaciones	108	
R	Recomendaciones para Futuros Análisis	109	
A	Anexos	110	

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1. Sistemas de tratamiento - Eficacia de eliminación y costes promedio de construcción	16
Tabla 2. Límites de calidad en cuerpos receptores para agua clase 2	17
Tabla 3. Límites de calidad para descargas de efluentes	18
Tabla 4. Disponibilidad de información Hidrométrica para el río Paraná	31
Tabla 5. Caudales de Bombeo PTAR Ciudad del Este	33
Tabla 6. Caracterización de líquido afluente	33
Tabla 7. Características máximas de la pluma de contaminación en el río Paraná para E1-Año 0	38
Tabla 8. Características máximas de la pluma de contaminación en el río Paraná para E2-Etapa1	42
Tabla 9. Características máximas de la pluma de contaminación en el río Paraná para E3-Etapa2	45
Tabla 10. Verificación de vertido con los límites de calidad para descargas de efluentes (Ley 1614/00) en el río Paraná para Año 0, ETAPA 1 y ETAPA 2	49
Tabla 11. Verificación de vertido vs. los límites de calidad en cuerpos receptores para agua clase 2 (Resolución 222/02) en el río Paraná	50
Tabla 12. Disponibilidad de información Hidrométrica en el río Paraguay	54
Tabla 13. Caudales de Bombeo PTAR Lambaré (L/s)	55
Tabla 14. Caracterización de líquido afluente	56
Tabla 15. Caracterización de adicional de coliformes fecales	56
Tabla 16. Coeficientes de Dispersión calculados para el río Paraguay en Lambaré	61
Tabla 17. Características máximas de la pluma de contaminación en el río Paraguay para E1-Año 0	62
Tabla 18. Características máximas de la pluma de contaminación en el río Paraguay para E1-Etapa 1	67
Tabla 19. Características máximas de la pluma de contaminación en el río Paraguay para E2-Año 0-Aguas Medias	75
Tabla 20. Características máximas de la pluma de contaminación en el río Paraguay para E2-Año 0-Aguas Altas	76
Tabla 21. Características máximas de la pluma de contaminación en el río Paraguay para E2-Etapa 1-Aguas Medias	80
Tabla 22. Características máximas de la pluma de contaminación en el río Paraguay para E2-Etapa1-Aguas Altas	85

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 23. Características máximas de la pluma de contaminación en el río Paraguay para E3-Año 0.	89
Tabla 24. Características máximas de la pluma de contaminación en el Paraguay para E3-Etapa 1	94
Tabla 25. Características máximas de la pluma de contaminación en el río Paraguay para E4-Etapa 1	98
Tabla 26. Características máximas de la pluma de contaminación en el río Paraguay para E5-Etapa 2	100
Tabla 27. Características máximas de la pluma de contaminación en el río Paraguay para E6-Etapa2-Aguas Bajas	
Tabla 28. Características máximas de la pluma de contaminación en el río Paraguay para E6-Etapa2-Aguas Medias	103
Tabla 29. Verificación de vertido con los límites de calidad para descargas de efluentes en el río Paraguay para el escenario de diseño (Aguas Bajas)	106
Tabla 30. Distancia en metros para normalización de parámetros cuyos valores se encuentran fuera de la norma en el área de vertido asumiendo valores para agua clase 2 en el río Paraguay	106



ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1.	Área Metropolitana de Asunción	19
Figura 2.	Mapa de ubicación de obras en el Área Metropolitana de Asunción	20
Figura 3.	Mapa de ubicación del departamento del Alto Paraná	21
Figura 4.	Mapa de ubicación de la PTAR Itaipú-Ciudad del Este	22
Figura 5.	Mallas triangulares flexibles	23
Figura 6.	Interfaz de usuario en QGIS	24
Figura 7.	Ecuaciones de aguas poco profundas 2D con transporte de solutos	25
Figura 8.	Área de estudio	28
Figura 9.	MDT de Ciudad del Este y Paraná	29
Figura 10.	Nube de puntos batimétrica levantada por UHE Itaipú y MDT Finalizado para el cauce del río Paraná	30
Figura 11.	Detalle del MDT modificado del río Paraná en Ciudad del Este	30
Figura 12.	Mapa de ubicación de la condición de contorno y el punto de descarga de efluentes	31
Figura 13.	Serie Temporal de caudales para el año 2013 en Puente de la Amistad	32
Figura 14.	Dominio de Cálculo	34
Figura 15.	Malla de Cálculo	34
Figura 16.	Detalle de la Malla de Cálculo en la zona de descarga de la PTAR	34
Figura 17.	Serie de caudales de 48 horas para período de estiaje (Aguas Bajas)	35
Figura 18.	Niveles de la superficie hídrica para distintos coeficientes de rugosidad vs. niveles de superficie hídrica medida	36
Figura 19.	Nivel de ajuste de la data monitoreada vs simulada para $n = 0.041$	36
Figura 20.	Pluma de contaminación para DBO en PTAR CDE para el escenario 1	39
Figura 21.	Pluma de contaminación para DQO en PTAR CDE para el escenario 1	39
Figura 22.	Pluma de contaminación para SST en PTAR CDE para el escenario 1	40
Figura 23.	Pluma de contaminación para NTK en PTAR CDE para el escenario 1	40
Figura 24.	Pluma de contaminación para Coliformes Fecales en PTAR CDE para el escenario 1	41
Figura 25.	Pluma de contaminación para Fósforo en PTAR CDE para el escenario 1	41
Figura 26.	Pluma de contaminación para DBO en PTAR CDE para el escenario 2	42
Figura 27.	Pluma de contaminación para DQO en PTAR CDE para el escenario 2	43

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 28.	Pluma de contaminación para SST en PTAR CDE para el escenario 2	43
Figura 29.	Pluma de contaminación para NTK en PTAR CDE para el escenario 2	44
Figura 30.	Pluma de contaminación para Coliformes Fecales en PTAR CDE para el escenario 2	44
Figura 31.	Pluma de contaminación para Fósforo en PTAR CDE para el escenario 2	45
Figura 32.	Pluma de contaminación para DBO en PTAR CDE para el escenario 3	46
Figura 33.	Pluma de contaminación para DQO en PTAR CDE para el escenario 3	47
Figura 34.	Pluma de contaminación para SST en PTAR CDE para el escenario 3	47
Figura 35.	Pluma de contaminación para NTK en PTAR CDE para el escenario 3	48
Figura 36.	Pluma de contaminación para Coliformes Fecales en PTAR CDE para el escenario 3	48
Figura 37.	Pluma de contaminación para Fósforo en PTAR CDE para el escenario 3	49
Figura 38.	Área de estudio y Modelo Digital del Terreno	52
Figura 39.	Nube de puntos batimétrica y MDT Final del Cauce del río Paraguay	53
Figura 40.	Detalle del MDT Total integrado del río Paraguay	53
Figura 41.	Ubicación de la estación hidrométrica Asunción	54
Figura 42.	Dominio de Cálculo	57
Figura 43.	Malla de Cálculo y detalle en zona de ubicación de la descarga del emisor	57
Figura 44.	Capa de superficie libre inicial de HydroBID Flood	58
Figura 45.	Localización de la traza de ubicación del emisario de la PTAR Lambaré	59
Figura 46.	Ubicación de las 5 zonas de descarga del emisor de la PTAR Lambaré	60
Figura 47.	Pluma de contaminación para DBO para el escenario 1, año 0 en la PTAR de Lambaré	63
Figura 48.	Pluma de contaminación para DQO para el escenario 1, año 0 en la PTAR de Lambaré	63
Figura 49.	Pluma de contaminación para Sólidos Suspendidos para el escenario 1, año 0 en la PTAR de Lambaré	64
Figura 50.	Pluma de contaminación para Nitrógeno para el escenario 1, año 0 en la PTAR de Lambaré	64

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 51. Pluma de contaminación para Fósforo para el escenario 1, año 0 en la PTAR de Lambaré	65
Figura 52. Pluma de contaminación para Coliformes Fecales para el escenario 1, año 0 en la PTAR de Lambaré	65
Figura 53. Pluma de contaminación para Grasas y Aceite para el escenario 1, año 0 en la PTAR de Lambaré	66
Figura 54. Pluma de contaminación para DBO para, escenario 1, ETAPA 1 en la PTAR Lambaré	67
Figura 55. Pluma de contaminación para DQO para, escenario 1, ETAPA 1 en la PTAR Lambaré	68
Figura 56. Pluma de contaminación para Sólidos Suspendidos para, escenario 1, ETAPA 1 en la PTAR Lambaré	68
Figura 57. Pluma de contaminación para Nitrógeno para, escenario 1, ETAPA 1 en la PTAR Lambaré	69
Figura 58. Pluma de contaminación para Fósforo para, escenario 1, ETAPA 1 en la PTAR Lambaré	69
Figura 59. Pluma de contaminación para Coliformes Fecales para, escenario 1, ETAPA 1 en la PTAR Lambaré	70
Figura 60. Pluma de contaminación para Grasas y Aceites para, escenario 1, ETAPA 1 en la PTAR Lambaré	70
Figura 61. Pluma de contaminación para DBO para escenario 2, AÑO 0 - AM en PTAR Lambaré	71
Figura 62. Pluma de contaminación para DQO para escenario 2, AÑO 0 - AM en PTAR Lambaré	72
Figura 63. Pluma de contaminación para Sólidos Suspendidos para escenario 2, AÑO 0 - AM en PTAR Lambaré	72
Figura 64. Pluma de contaminación para Nitrógeno para escenario 2, AÑO 0 - AM en PTAR Lambaré	73
Figura 65. Pluma de contaminación para Fósforo para escenario 2, AÑO 0 - AM en PTAR Lambaré	73
Figura 66. Pluma de contaminación para Coliformes Fecales para escenario 2, AÑO 0 - AM en PTAR Lambaré	74
Figura 67. Pluma de contaminación para Grasas y Aceite para escenario 2, AÑO 0- AM en PTAR Lambaré	74

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 68. Pluma de contaminación para DBO para escenario 2, AÑO 0 - AA para PTAR Lambaré	76
Figura 69. Pluma de contaminación para DQO para escenario 2, AÑO 0 - AA para PTAR Lambaré	77
Figura 70. Pluma de contaminación para Sólidos Suspendidos para escenario 2, AÑO 0 - AA para PTAR Lambaré	77
Figura 71. Pluma de contaminación para Nitrógeno para escenario 2, AÑO 0 - AA para PTAR Lambaré	78
Figura 72. Pluma de contaminación para Fósforo para escenario 2, AÑO 0 - AA para PTAR Lambaré	78
Figura 73. Pluma de contaminación para Coliformes Fecales para escenario 2, AÑO 0 - AA para PTAR Lambaré	79
Figura 74. Pluma de contaminación para Grasas y Aceite para escenario 2, AÑO 0 - AA para PTAR Lambaré	79
Figura 75. Pluma de contaminación para DBO para escenario 2, ETAPA 1 - AM en PTAR Lambaré	81
Figura 76. Pluma de contaminación para DQO para escenario 2, ETAPA 1 - AM en PTAR Lambaré	81
Figura 77. Pluma de contaminación para Sólidos Suspendidos para escenario 2, ETAPA 1 - AM en PTAR Lambaré	82
Figura 78. Pluma de contaminación para Nitrógeno para escenario 2, ETAPA 1 - AM en PTAR Lambaré	82
Figura 79. Pluma de contaminación para Fósforo para escenario 2, ETAPA 1 - AM en PTAR Lambaré	83
Figura 80. Pluma de contaminación para Coliformes Fecales para escenario 2, ETAPA 1 - AM en PTAR Lambaré	83
Figura 81. Pluma de contaminación para Grasas y Aceite para escenario 2, ETAPA 1 - AM en PTAR Lambaré	84
Figura 82. Pluma de contaminación para DBO para escenario 2, ETAPA 1 - AA para PTAR Lambaré	85
Figura 83. Pluma de contaminación para DQO para escenario 2, ETAPA 1 - AA para PTAR Lambaré	86
Figura 84. Pluma de contaminación para Sólidos Suspendidos para escenario 2, ETAPA 1 - AA para PTAR Lambaré	86

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 85.	Pluma de contaminación para Nitrógeno para escenario 2, ETAPA 1 - AA para PTAR Lambaré	87
Figura 86.	Pluma de contaminación para Fósforo para escenario 2, ETAPA 1 - AA para PTAR Lambaré	87
Figura 87.	Pluma de contaminación para Coliformes Fecales para escenario 2, ETAPA 1 - AA para PTAR Lambaré	88
Figura 88.	Pluma de contaminación para Grasas y Aceite para escenario 2, ETAPA1 - AA para PTAR Lambaré	88
Figura 89.	Pluma de contaminación para DBO para escenario 3, AÑO 0 para PTAR Lambaré	90
Figura 90.	Pluma de contaminación para DQO para escenario 3, AÑO 0 para PTAR Lambaré	90
Figura 91.	Pluma de contaminación para Sólidos Suspendidos para escenario 3, AÑO 0 para PTAR Lambaré	91
Figura 92.	Pluma de contaminación para Nitrógeno para escenario 3, AÑO 0 para PTAR Lambaré	91
Figura 93.	Pluma de contaminación para Fósforo para escenario 3, AÑO 0 para PTAR Lambaré	92
Figura 94.	Pluma de contaminación para Coliformes Fecales para escenario 3, AÑO 0 para PTAR Lambaré	92
Figura 95.	Pluma de contaminación para Grasas y Aceite para escenario 3, AÑO 0 para PTAR Lambaré	93
Figura 96.	Pluma de contaminación para DBO para escenario 3, ETAPA 1 para la PTAR Lambaré	94
Figura 97.	Pluma de contaminación para DQO para escenario 3, ETAPA 1 para la PTAR Lambaré	95
Figura 98.	Pluma de contaminación para Sólidos Suspendidos para escenario 3, ETAPA 1 para la PTAR Lambaré	95
Figura 99.	Pluma de contaminación para Nitrógeno para escenario 3, ETAPA 1 para la PTAR Lambaré	96
Figura 100.	Pluma de contaminación para Fósforo para escenario 3, ETAPA 1 para la PTAR Lambaré	96
Figura 101.	Pluma de contaminación para Coliformes Fecales para escenario 3, ETAPA 1 para la PTAR Lambaré	97

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 102. Pluma de contaminación para Grasas y Aceite para escenario 3, ETAPA 1 para la PTAR Lambaré	97
Figura 103. Pluma de contaminación para DBO para el escenario 4, ETAPA 1 para la PTAR Lambaré	99
Figura 104. Pluma de contaminación para CF para el escenario 4, ETAPA 1 (desinfección) para la PTAR Lambaré	99
Figura 105. Pluma de contaminación para CF para el escenario 4, ETAPA 1 (tratamiento) para la PTAR Lambaré	100
Figura 106. Pluma de contaminación para DBO para el escenario 5, ETAPA 2 para la PTAR Lambaré	101
Figura 107. Pluma de contaminación para DBO para el escenario 6, ETAPA 2 (AB) para la PTAR Lambaré	102
Figura 108. Pluma de contaminación para Coliformes Fecales para el escenario 6, ETAPA 2 (AB) para la PTAR Lambaré	103
Figura 109. Pluma de contaminación para DBO para el escenario 2, ETAPA 2 (AM) para la PTAR Lambaré	104
Figura 110. Pluma de contaminación para Coliformes Fecales para el escenario 2, ETAPA 2 (AM) para la PTAR Lambaré	104



PRÓLOGO

En América Latina y el Caribe alrededor del 22% de los habitantes de las zonas urbanas aún no tienen acceso a la red de alcantarillado sanitario y apenas el 20% de las aguas residuales, de origen doméstico, industrial o productivo, reciben algún tipo de tratamiento antes de ser vertidos en los cuerpos de agua. En el caso de Paraguay la situación es aún peor debido a que tan solo el 14,3% de la población del país cuenta con acceso a redes de alcantarillado sanitario; en cuanto al tratamiento de aguas residuales, apenas el 4,2% de las aguas recolectadas a través de las redes reciben algún tipo de tratamiento. Esto representa una problemática bastante compleja desde el punto de vista ambiental y de salubridad.

Las infraestructuras para tratamiento de las aguas residuales son uno de los componentes más costosos en lo que se refiere a la provisión de un servicio integral de saneamiento, siendo su costo directamente proporcional a la eficiencia de la tecnología utilizada y, por consiguiente, a la calidad del efluente tratado. Por ello es importante que durante el proceso de planificación del saneamiento se consideren, en adición a los aspectos técnicos y económicos, los factores ambientales y sociales. Específicamente, en relación con los aspectos ambientales, es clave considerar las características del cuerpo de agua que recibirá los efluentes tratados, dado que su capacidad de asimilación y recuperación natural permitirá definir el nivel de tratamiento mínimo requerido para inhibir efectos negativos sobre la calidad del cuerpo receptor.

El presente estudio contempla la modelación de la pluma de contaminación de las descargas de las futuras plantas de pre tratamiento de aguas residuales (PTAR) a ser construidas en Ciudad del Este (Paraguay) y en la ciudad de Lambaré (Paraguay), con el propósito de verificar el efecto de los efluentes sobre el cuerpo de agua y garantizar que los vertidos estimados para las PTAR en todas sus fases de diseño y operación, tanto en ubicación como en concentración, cumplan con las normas locales y no generen impactos negativos ambientales o de salud. El análisis de la información producida permitió generar algunas conclusiones y recomendaciones desde el punto de vista de planificación de obras y adicionalmente ayudó a identificar necesidades de monitoreo que podrían implementarse para mejorar la disponibilidad y calidad de información relativa a los recursos hídricos.

Para la modelación se ha utilizado el **HydroBID Flood**, que es una de las herramientas que forman parte del grupo de modelos **HydroBID**, ofrecidos por el Centro de Soporte HydroBID del BID (CeSH), y que consiste en un modelo de hidrodinámica 2D con componente hidrológico distribuido, basado en el modelo RiverFlow2D, que permite simulaciones detalladas para apoyar la preparación y mitigación de inundaciones y el diseño de infraestructura con visión resiliente. El mismo, nace con la finalidad de proveer a las agencias e instituciones de países miembros del Banco Interamericano de Desarrollo (BID) con una herramienta capaz de procurar información detallada, precisa y completa sobre hidrodinámica e hidrología de detalle,

que permita evaluar el impacto de inundaciones fluviales, pluviales y costeras, apoyar el diseño y evaluación de canales, embalses, diques, puentes, drenajes urbanos, evaluar procesos de transporte de sedimentos y de calidad de las aguas.



1. [HydroBID Flood: Manual de referencia versión 2.0. BID, 2020.](#)

AGRADECIMIENTOS

Esta publicación resume el trabajo realizado por el equipo técnico del Banco Interamericano de Desarrollo (BID) como parte del diseño del anteproyecto avanzado de las PTAR previstas en los proyectos de inversión: *“Proyecto de agua potable y saneamiento para el Área Metropolitana de Ciudad del Este”* (RG-L1134) y *“Proyecto de agua y saneamiento para el Área Metropolitana de Asunción – Cuenca Lambaré”* (PR-L1172).

Los autores de esta publicación agradecen el apoyo brindado por la Dirección de Agua Potable y Saneamiento (DAPSAN) y la Dirección de Gestión Socioambiental (DGSA) del Ministerio de Obras Públicas y Comunicaciones (MOPC), la Empresa de Servicios Sanitarios del Paraguay (ESSAP S.A.) y la Dirección General de Protección y Conservación de los Recursos Hídricos (DGPCRH) del Ministerio del Ambiental y Desarrollo Sostenible (MADES), en el proceso de recopilación de información y revisión del análisis realizado.



INTRODUCCIÓN Y ANTECEDENTES

Paraguay es uno de los países más pequeños y menos poblados de Sudamérica, con 406.752 km² y 7.2 millones de habitantes. La tasa de urbanización del país es de aproximadamente 62%, una de las más bajas de América Latina y el Caribe (ALC). En términos de infraestructura sanitaria, apenas el 14,3% de la población del país cuenta con acceso a redes de alcantarillado sanitario, estando por debajo del promedio regional que se encuentra en 77%.² En cuanto al tratamiento de aguas residuales, apenas el 4,2% de las aguas recolectadas a través de las redes reciben algún tipo de tratamiento. Si bien, en cuanto se construyan y mantengan adecuadamente, las soluciones individuales de saneamiento actualmente utilizadas por gran parte de la población, pozos ciegos o pozos sépticos, representan una solución viable desde el punto de vista técnico y ambiental, en las zonas urbanas más densamente pobladas la ausencia de un sistema colectivo de recolección y tratamiento de aguas residuales tiene efectos negativos ejerciendo una presión sobre los cuerpos de agua superficial y subterránea, como lo evidencian los casos del Lago Ypacaraí³ y el Acuífero Patiño⁴, que por la ausencia de un sistema de saneamiento adecuado en sus áreas de influencia se encuentran contaminados.

En este contexto, el país presenta desafíos en términos de planificación del saneamiento, evidenciado por la degradación de los cuerpos de agua y sus ecosistemas asociados, y por el otro, la imposibilidad de aumentar las inversiones de saneamiento al ritmo necesario para cubrir las brechas actuales, debido a las restricciones económicas y fiscales. Por este motivo es necesario realizar la priorización de inversiones a través de herramientas que permitan tomar decisiones basadas en evidencia, tales como el HydroBID Flood que permite analizar y evaluar con detalle el diseño y comportamiento de infraestructuras que tienen relación o dependen de los recursos hídricos.

A continuación, se presenta la utilización del HydroBID como herramienta de apoyo para la toma de decisiones en la planificación del saneamiento en las dos principales áreas metropolitanas del Paraguay.

Desafíos en el proceso de planificación del saneamiento urbano: Caso Paraguay

El saneamiento ambiental implica el desarrollo de acciones técnicas y socioeconómicas de salud pública para la mejora en las condiciones de salubridad de la población. Un aspecto clave para el cumplimiento de este objetivo es lograr una gestión adecuada de las aguas residuales, existiendo hoy en día una variedad de tecnologías y enfoques para esto.

2. Washdata.org.

3. Kunze, F y Silvero, J. 2013. Informaciones sobre las actividades humanas que condicionan la calidad de agua del Río Paraguay, Lago Ypacaraí y otros afluentes. Nota N.C.P.C.N.N 5. MADES.

4. Arrabal, M., y Álvarez, M. 2019. Estudio de recursos hídricos y vulnerabilidad del acuífero Patiño. BID.

En el sector urbano, específicamente en las áreas más densamente pobladas, la solución comúnmente utilizada es el alcantarillado sanitario, para la recolección de las aguas residuales, y la PTAR, para el tratamiento de estas antes de su vertido al cuerpo receptor. En Paraguay, las grandes brechas existentes en términos infraestructura sanitaria y los altos costos de este tipo de intervenciones obligan a adoptar un enfoque gradual en la implementación de estas, siendo necesario realizar una priorización en términos de alcance.

Cobertura de recolección vs. Calidad de Tratamiento

En el caso de las redes de alcantarillado, en donde el objetivo es la recolección de las aguas residuales, la misma no presenta muchas variantes en términos de tecnología. Sin embargo, en el caso de las PTAR al ser el objetivo principal el tratamiento de las aguas residuales y la disposición adecuada de los efluentes de origen doméstico e industrial, reduciendo los riesgos para la salud humana o el medioambiente, existen a la fecha diversos sistemas de tratamiento con diferentes niveles de eficacia en la remoción de contaminantes presentes en el agua, conforme se puede ver en la Tabla 1 (Von Sperling⁵, 1996), en donde se presentan algunos ejemplos.

Tabla 1. Sistemas de tratamiento – Eficacia de eliminación y costes promedio de construcción.

Sistema de tratamiento	Eficacia de eliminación (%)				Costes de construcción (US\$/hab)
	DBO	Nitrógeno	Fósforo	Coliformes fecales	
Tratamiento preliminar	0 – 5	0	0	0	2-8
Tratamiento primario	35-40	10-25	10-20	30-40	20-30
UASB	60 - 80	10-25	10-20	60-90	20-40
Sequencing Batch Reactor (SBR)	85-95	30-40	30-45	60-90	50-80
Lodos activados convencional	85-93	30-40	30-45	60-90	60-120

5. Von Sperling M. 1996. Comparison among the most frequently used systems for wastewater treatment in developing countries. Water science and technology., 156-180.

En este sentido, si bien el criterio económico, directamente relacionado con la eficacia del tratamiento, es un aspecto a considerar, existen otros aspectos clave que deben ser tenidos en cuenta al momento de planificar el saneamiento urbano, tales como los técnicos (por ej. calidad de las aguas residuales afluentes), ambientales (por ej. normativa respecto a la calidad del efluente o tipo de cuerpo receptor) y sociales (por ej. potencial afectación social por generación de olores), siendo necesario sopesar cada uno de estos durante el proceso de planificación de la infraestructura.

En el caso específico del Paraguay, la normativa ambiental que vela por la calidad de las aguas nacionales es la Resolución *MADES 222/02 "Calidad de las Aguas en el territorio nacional"*. Esta normativa clasifica los cuerpos de agua en 4 clases, según los usos preponderantes que se den al mismo y establece los parámetros límites con los que debe contar cada clase de agua. Al analizar la posible afectación al medio acuático por el vertimiento de efluentes desde una PTAR, estos valores solo podrían ser cumplidos mediante técnicas de tratamiento avanzadas. Sin embargo, considerando el contexto local de desarrollo gradual de las infraestructuras de recolección, tratamiento y vertido de aguas residuales a cuerpos de agua, el Artículo 9 de la Resolución permite vertimientos por encima de los valores máximos, dependiendo del tipo de tratamiento y condiciones adecuadas de operación, previa realización de un estudio de autodepuración que compruebe que las condiciones del curso de agua recuperan sus características de calidad aguas debajo del sitio de vertido.

En este sentido, en Paraguay, en vista a los bajos niveles de cobertura del servicio de alcantarillado sanitario y la alta degradación ambiental en las zonas urbanas densamente pobladas, es imperante la priorización de inversiones de recolección de efluentes, con el objetivo de lograr progresivamente mayores niveles de cobertura. Una opción para lograr esto es promover soluciones de tratamiento más económicas de tipo preliminar, independientemente de que las mismas no cumplan en el corto plazo con los estándares ambientales de calidad de aguas, dado que representan un primer paso en el proceso de saneamiento y una situación más favorable que verter directamente los efluentes al cuerpo receptor sin tratamiento previo. Lo anterior, siempre teniendo en cuenta el criterio de cumplimiento del régimen de lanzamiento de efluentes establecido en la Resolución 222/02⁶, que pueden ser fácilmente cumplidos en el caso de ríos mayores como el Paraguay (caudal promedio >1500m³/s) y el Paraná (caudal promedio >10.000 m³/s), favoreciendo el efecto de autodepuración y afectación mínima sobre la calidad de las aguas.

El presente estudio tiene la finalidad de verificar que las condiciones de diseño del vertido de las PTAR propuestas para los proyectos previamente mencionados cumplan con las normas vigentes del MADES de Paraguay y las salvaguardias ambientales del Grupo BID⁷. Adicionalmente, ante la necesidad de desarrollo gradual y progresivo del sector de agua potable y saneamiento, y el desafío actual de proteger y gestionar adecuadamente los recursos hídricos, se busca fomentar la aplicación de nuevos instrumentos tecnológicos que apoyen la toma de decisión informada y la definición de directrices para el cumplimiento de los objetivos sectoriales en la región y, específicamente, en el Paraguay.

Para los fines de este estudio los límites de calidad en el cuerpo receptor se revisarán según la normativa vigente, tomando en cuenta que todas las aguas superficiales en Paraguay están clasificadas como de Clase 2, según la Resolución 222/02, por lo cual, los límites de calidad a considerar en los cuerpos receptores son los siguientes:

Tabla 2. Límites de calidad en cuerpos receptores para agua clase 2.

Parámetro	Unidades	Valor
DBO Total	mg/l	Hasta 5
DQO	mg/l	Hasta 5
Sólidos Suspendidos Totales (SST)	mg/l	-
Nitrógeno Total (NTK)	mg/l	Hasta 0.6
Coliformes Fecales	NMP/100 mg/l	Hasta 1000
Fósforo	mg/l	Hasta 0.05

Adicionalmente, la Ley 1614/00/00 “Ley general del marco regulatorio y tarifario del servicio de agua potable y alcantarillado sanitario”, en su Anexo II establece límites de calidad para descarga al cuerpo receptor, para el caso de Tratamiento Primario o Secundario, y no así para Pretratamiento, como se ilustra en la tabla 3.

Según la Resolución 222/02, agua de Clase 2 son aquellas destinadas a: (i) Abastecimiento doméstico después de los tratamientos convencionales; (ii) Protección de las comunidades acuáticas; (iii) Para recreación de contacto primario (esquí acuático, natación); (iv) Para la irrigación de hortalizas y plantas fructíferas; y (v) Para la cría natural y/o intensiva (acuicultura) de especies destinadas para la alimentación humana.

En el Anexo A se presentan resumidamente las normativas y las políticas de salvaguardas ambientales aplicables a los proyectos objeto de 7.análisis.

Tabla 3. Límites de calidad para descargas de efluentes.

Parámetro	Unidades	Descarga a Colectoras	Descarga con tratamiento primario	Descarga con tratamiento secundario
DBO Total	mg/l	250	<120	<50
DQO	mg/l	600	<310	<50
Sólidos Suspendidos Totales (SST)	mg/l	500	<100	<80
Nitrógeno Total (NTK)	mg/l	-	-	-
Coliformes Fecales	NMP/100 mg/l		<4000	<4000
Fósforo	mg/l	-		

Área Metropolitana de Asunción

El Área Metropolitana de Asunción (AMA) se encuentra ubicada al este de la región oriental de Paraguay colindando con Argentina en la margen² derecha del río Paraguay (Figura 1). De acuerdo con el Instituto Nacional de Estadísticas (INE) el AMA cuenta con una población de 2.160.000 (30% de la población total de Paraguay) distribuida en 10 municipios (incluyendo Asunción) y ocupando una superficie de 807 km². El AMA es el área más densamente poblada del país y también la más productiva, concentrando la mitad del PIB. En Asunción, Paraguay y Argentina comparten la cuenca del río Paraguay, uno de los corredores de desarrollo regional e integración de mayor importancia del cono sur.

En las últimas décadas el AMA ha experimentado un incremento demográfico promedio anual del 7%, superior al promedio nacional; sin embargo, la zona no ha contado con una expansión de sus sistemas de alcantarillado sanitario equivalente a su relevancia económica y social. De acuerdo con el Ente Regulador de Servicios Sanitarios (ERSSAN), sólo el 30% de la población del AMA cuenta con acceso a alcantarillado sanitario, mientras el 70% de la población emplea soluciones alternativas para disponer de las aguas servidas. Como resultado de esto, una alta proporción de las aguas servidas terminan contaminando el acuífero Patiño y drenando a los diferentes cuerpos de agua que confluyen en el río Paraguay. En adición a la baja cobertura de estos servicios, existe una disparidad geográfica importante, ya que mientras que el 81,8% de Asunción tiene acceso a algún tipo de solución sanitaria, esta proporción se reduce a 67,6% para el resto del AMA. En el caso del alcantarillado sanitario las coberturas son de 66,4% para



Asunción y apenas 7,3% para el resto de AMA.

Para hacer frente a esta problemática, en el año 2012, la Empresa de Servicios Sanitarios del Paraguay (ESSAP S.A.) formuló la actualización del Plan Maestro de Alcantarillado Sanitario y Tratamiento de Aguas Residuales del AMA (APM), identificando proyectos, acciones y necesidades infraestructura, en un programa de inversiones proyectado a 30 años y con un monto estimado de US\$518 millones, necesarios para universalizar este servicio, recolectando y tratando el 100% de las aguas residuales del AMA. Como parte del proceso de desarrollo del APM se realizó un ejercicio de priorización para el avance progresivo de la cobertura del alcantarillado sanitario, identificando a la cuenca de Lambaré como una de las más prioritarias, teniendo en cuenta aspectos técnicos, económicos, ambientales y sociales.



Figura 1. Área Metropolitana de Asunción.

Con la finalidad de apoyar el aumento progresivo de la cobertura de recolección y tratamiento de aguas residuales en esta zona del país, el Gobierno de Paraguay, con financiamiento del BID y

de FONPRODE⁸, se encuentra desarrollando el proyecto denominado: “*Proyecto de Agua Potable y Saneamiento para el Área Metropolitana de Asunción - Cuenca Lambaré*”. El proyecto tiene como objetivo contribuir al mejoramiento de la calidad, continuidad y a la ampliación de la cobertura de los servicios de agua potable y alcantarillado sanitario en el Área Metropolitana de Asunción. En el caso del agua, a través de la implementación de un programa de reducción de agua no contabilizada, y en el caso del saneamiento mediante la construcción y ampliación de redes de alcantarillado sanitario (impulsiones, colectores principales, secundarios y conexiones domiciliarias), estaciones de bombeo, una PTAR de tratamiento preliminar con capacidad de 2.226 l/s y un emisario subfluvial (Figura 2).

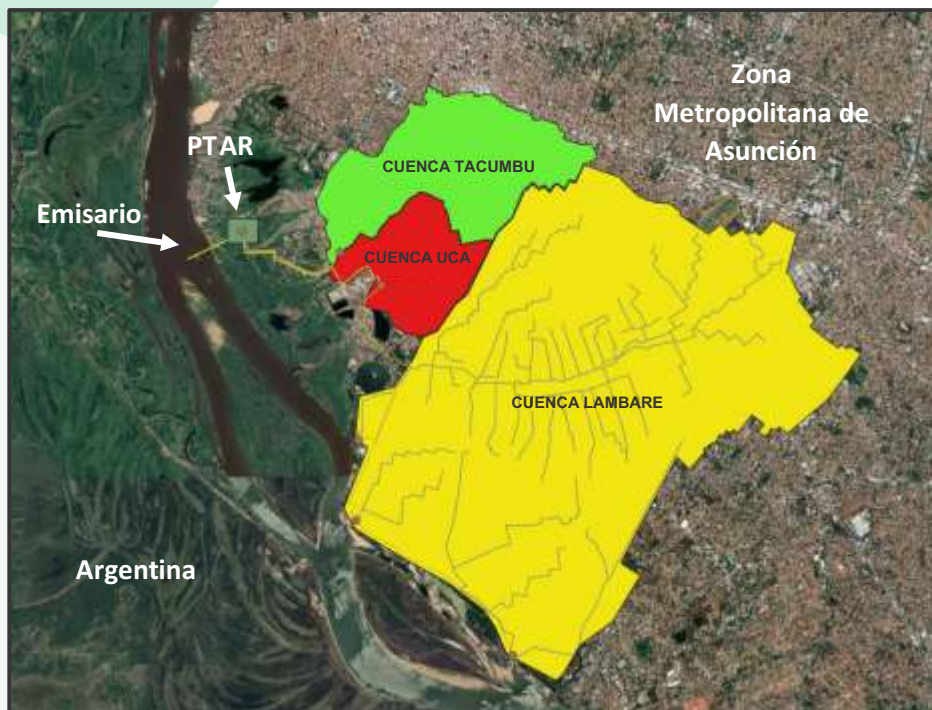


Figura 2. Mapa de ubicación de obras en el Área Metropolitana de Asunción.

Área Metropolitana de Ciudad del Este

El Departamento del Alto Paraná, se ubica al este de la región oriental del Paraguay y limita con Brasil y Argentina, encontrándose separado de estos por el río Paraná (Figura 3). Ciudad del Este se encuentra aguas abajo de la represa de Itaipú, una de las centrales hidroeléctricas más grandes del mundo. Según la Encuesta Permanente de Hogares del año 2017, cuenta con una población total de 796.658 habitantes distribuidos en los 22 municipios del Departamento. El 70% de esta población habita en los 4 municipios, que conforman el Área Metropolitana de Ciudad del Este (AMCE), como se denomina a la conurbación de los municipios de Ciudad del Este, Minga Guazú, Hernandarias y Presidente Franco, siendo esta la segunda aglomeración

⁸. Fondo Español para la Promoción del Desarrollo.

urbana del país, después del Área Metropolitana de Asunción (AMA).

En términos de infraestructura sanitaria, la cobertura de alcantarillado en el AMCE es baja y el tratamiento de aguas residuales inexistente, alcanzando a apenas el 7% de la población (unos 15.000 hogares) del microcentro de Ciudad del Este y algunas viviendas de la zona de influencia de la hidroeléctrica Itaipú Binacional. La población restante posee soluciones individuales como pozos sépticos (90%) o descarga sus efluentes en la vía pública o en cuerpos de agua (por ej. Arroyos urbanos). Adicionalmente, en el caso de los pozos sépticos, por su deficiente mantenimiento, se infiltran y contaminan los acuíferos someros, parte del área de recarga del Sistema Acuífero Guaraní, que son usados para la provisión de agua potable⁹. No existen plantas de tratamiento de aguas residuales (PTAR) por lo que la totalidad de las aguas residuales recolectadas por los sistemas de ESSAP e Itaipú son arrojadas sin ningún tratamiento, generando impactos negativos en el cuerpo receptor.



Figura 3. Mapa de ubicación del departamento del Alto Paraná.

⁹Evidencia del impacto de la contaminación de AR de sistemas individuales sobre el subsuelo y el agua subterránea. Groundwater and its susceptibility to degradation. UNEP 2003.

Por causa de esta problemática que ya lleva décadas, en el año 2015, la ESSAP formuló el “Anteproyecto Avanzado y Estudio de Factibilidad Socioeconómica del Sistema de Agua Potable y Alcantarillado Sanitario de los Distritos de Ciudad del Este, presidente Franco, Hernandarias y Minga Guazú del Departamento de Alto Paraná”, para universalizar los servicios de agua potable, alcantarillado y tratamiento de aguas residuales por un valor de aproximadamente US\$1.200 millones. Sin embargo, dado el monto elevado se decidió avanzar en 6 etapas en un período de 30 años.

Para ello el Gobierno de Paraguay gestionó ante el BID y la JICA¹⁰ el “Proyecto de Agua Potable y Saneamiento para el Área Metropolitana de Ciudad del Este”, que tiene como objetivo contribuir al mejoramiento de la calidad, continuidad y a la ampliación de la cobertura de los servicios de agua potable y alcantarillado sanitario en el Área Metropolitana de Ciudad del Este. En lo que se refiere al agua, a través de la construcción de una planta de tratamiento de agua potable (PTAP) con capacidad de 500 l/s, ubicada a las márgenes del río Monday, estaciones de bombeo, centros de distribución y redes de distribución de agua; en lo referente al saneamiento, mediante la ampliación de las redes de alcantarillado sanitario (impulsiones, colectores principales, secundarios y conexiones domiciliarias), estaciones de bombeo, una PTAR de tratamiento preliminar con capacidad de 500 l/s y un emisario subfluvial (Figura 4).



Figura 4. Mapa de ubicación de la PTAR Itaipú-Ciudad del Este.

10. Agencia Japonesa de Cooperación Internacional.

SIMULACIONES PARA VERIFICACIÓN DE LAS DESCARGAS DE EMISARIOS CON HYDROBID FLOOD

HydroBID Flood

HydroBID Flood, que tiene como base el motor de cálculo del modelo RiverFlow2D, es un modelo combinado de simulación hidráulica e hidrológica, evolución del fondo y transporte de contaminantes para ríos, estuarios y llanuras de inundación, basado en el método de volúmenes finitos. Es capaz de transportar avenidas en ríos y simular inundaciones sobre llanuras y terrenos complejos con una alta resolución, velocidad remarcable y gran estabilidad y precisión. El uso de mallas de celdas triangulares adaptativas al terreno permite resolver el flujo alrededor de puntos clave en cualquier entorno fluvial (Figura 5).

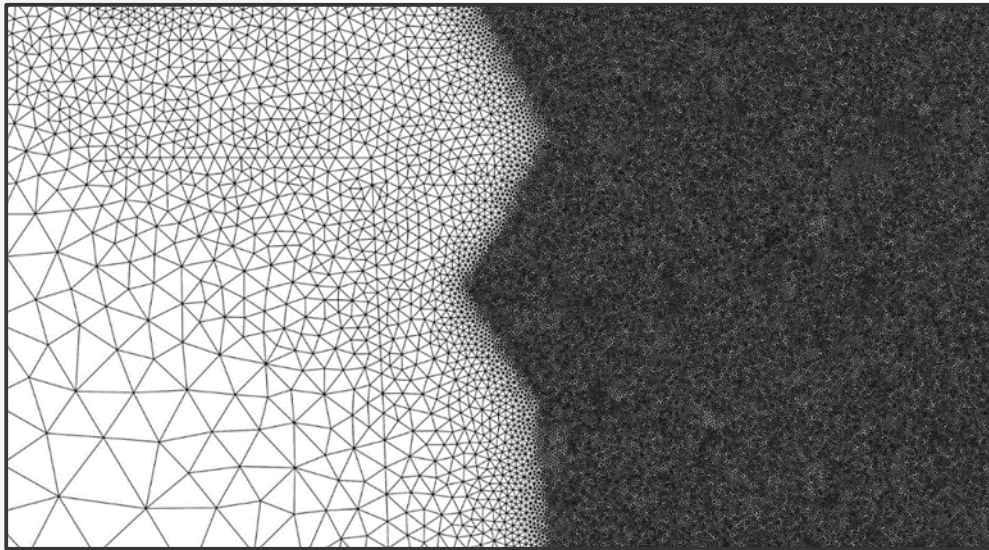


Figura 5. Mallas triangulares flexibles.

La interfaz de usuario de HydroBID Flood está basada en el Sistema de Información Geográfica QGIS (www.qgis.org). Se ha desarrollado un complemento (plugin) para QGIS que provee interfaz gráfica de usuario de tipo GIS que proporciona funcionalidades interactivas para generar y refinar la malla usada por HydroBID Flood (Figura 6). HydroBID Flood usa objetos familiares de GIS, como puntos, arcos (polilíneas) y polígonos para construir una representación de alto nivel del modelo, facilitando la asignación de condiciones de contorno y del parámetro que define la rugosidad del fondo de cada celda, permitiendo al usuario gestionar de forma efectiva el proceso de modelado.

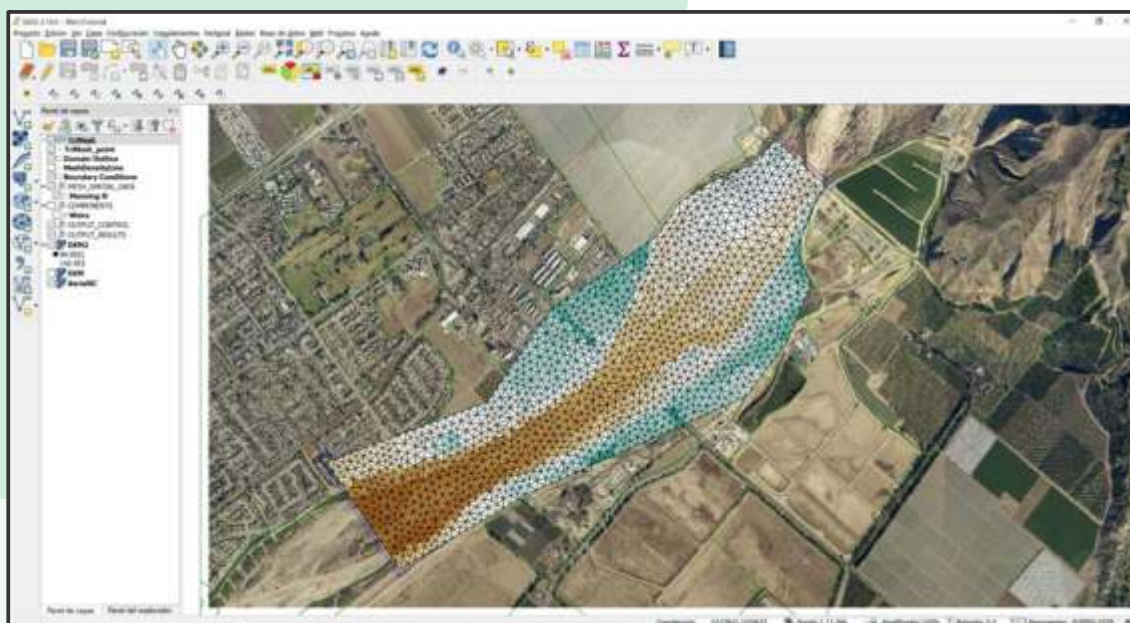


Figura 6. Interfaz de usuario en QGIS.

HydroBID Flood utiliza las ecuaciones de aguas poco profundas resultantes de la integración en la vertical de las ecuaciones de Navier-Stokes. Por lo tanto, el modelo no calcula aceleraciones ni velocidades verticales y consecuentemente no puede resolver flujos secundarios. El esfuerzo de fondo se supone que sigue las direcciones de la velocidad promediada en la vertical. El modelo hidráulico no incluye términos de dispersión ni turbulencia. La disipación turbulenta y las pérdidas de energía se tienen en cuenta mediante el término n de Manning en las ecuaciones de cantidad de Movimiento.

El modelo puede integrar estructuras hidráulicas como alcantarillas, presas, puentes, compuertas y tablas de gasto internas. Las capacidades hidrológicas incluyen lluvia, infiltración y evaporación espacialmente distribuidas. Esta versión también cuenta con la funcionalidad del cálculo del esfuerzo del viento sobre la superficie del agua.

El modelo cuenta con módulos de transporte de sedimentos, erosión de pilas de puente, drenaje urbano, transporte de contaminantes y calidad del agua.

Datos Básicos

Los modelos digitales de terreno (MDT) o de superficie (MDS) representan el dato más importante para la implementación de un modelo hidrodinámico 2D, debido a que representan el territorio a analizar. Al estar incorporado al QGIS, el HydroBID Flood permite, adicionalmente, trabajar con una serie de formatos de datos de donde se pueden obtener el modelo digital, tales como curvas de nivel en formato CAD, nubes de puntos y secciones transversales. La calidad del modelo digital influenciará de manera determinante los resultados y el nivel de detalle requerido dependerá del tipo de ambiente y fenómeno que se desea analizar.

HydroBID Flood permite utilizar múltiples modelos digitales sin que estén integrados, lo que representa una optimización de tiempo y una ventaja en procesos de análisis de opciones de diseño.

La caracterización del suelo, o cauce, se hace a través de mapas de usos de suelo y texturas, y estos se utilizan para definir los coeficientes de fricción (n de Manning), para la componente hidráulica, y los parámetros de infiltración, para la componente hidrológica.

Las condiciones de contorno representan las forzantes de entrada y salida del HydroBID Flood. El modelo incluye una variedad de opciones a utilizar dependiendo del fenómeno a estudiar y de las características topográficas de la zona de estudio. Las condiciones de entrada más comunes son las series temporales de caudales vs tiempo y los hietogramas de precipitación, mientras que las condiciones de salida más comunes son, la condición de flujo uniforme, las series temporales de niveles vs tiempo y las mareas.

En caso de estudios específicos, a través de los módulos existentes se requerirá información adicional como concentraciones de solutos a analizar en el modelo de transporte de contaminantes.

Modelo de Transporte de Solutos

El estudio de los fenómenos de transporte de solutos se ha convertido en una gran preocupación en problemas hidráulicos y medioambientales. El modelo de transporte de contaminantes de HydroBID Flood (Riverflow2D) proporciona una herramienta útil para calcular concentraciones de múltiples contaminantes en una variedad de situaciones en ríos y estuarios¹¹.

En el modelo, las ecuaciones de transporte de solutos se expresan en forma conservativa, suponiendo que las velocidades y la profundidad pueden no variar suavemente en el espacio y tiempo. De esta forma, el modelo de aguas poco profundas 2D con transporte de solutos se puede escribir en un único sistema acoplado (Figura 7).

$$\frac{\partial \mathbf{U}}{\partial t} + \frac{\partial \mathbf{F}(\mathbf{U})}{\partial x} + \frac{\partial \mathbf{G}(\mathbf{U})}{\partial y} = \mathbf{H}(\mathbf{U}) + \mathbf{R}(\mathbf{U}) + \mathbf{D}(\mathbf{U})$$

donde

$$\mathbf{U} = (h, q_x, q_y, h\phi)^T$$

$$\mathbf{F} = \left(q_x, \frac{q_x^2}{h} + \frac{1}{2}gh^2, \frac{q_x q_y}{h}, h\phi u \right)^T, \quad \mathbf{G} = \left(q_y, \frac{q_x q_y}{h}, \frac{q_y^2}{h} + \frac{1}{2}gh^2, h\phi v \right)^T$$

$$\mathbf{H} = \left(0, gh(S_{0x} - S_{fx}), gh(S_{0y} - S_{fy}), 0 \right)^T$$

Figura 7. Ecuaciones de aguas poco profundas 2D con transporte de solutos.

11. ARiverFlow2D QGIS in <http://www.hydronia.com/tests-docs>.

Donde:

- U es el vector de variables conservadas en la vertical, F y G son los vectores de flujo y en los cuales, h es la profundidad de agua; qx y qy son los caudales unitarios; u y v son las componentes del vector velocidad promediadas en la vertical a lo largo de las coordenadas x, y, respectivamente; f - es la concentración de soluto promediada en la vertical.
- H es el vector de términos fuente que incorpora el efecto de la fuerza de presión sobre el fondo y las fuerzas tangenciales generadas por el esfuerzo de fondo, en la cual Sox y Soy son las pendientes de nivel del fondo y Sfx y Sfy son los esfuerzos de fondo que se modela a través de la ley de fricción de Manning.
- Los términos fuente asociados a la ecuación de transporte de solutos son expresados como sigue:

$$R = (0,0,0, -kh\phi)^T \quad D = (0,0,0, \vec{\nabla} (Dh\vec{\nabla}\phi))^T$$

Donde K es la constante de absorción y D es una matriz de difusión empírica.



CASOS DE ESTUDIO:

1. PTAR CIUDAD DEL ESTE



1.1. ÁREA DE ESTUDIO Y TOPOGRAFÍA

El área de estudio comprende el tramo de aproximadamente 12 km del río Paraná, desde la confluencia con el río Acaray hasta la confluencia con el río Monday. La ubicación de la futura PTAR se encuentra en la margen derecha a 2.3 km aguas abajo de la confluencia con el río Acaray (Figura 8).



Figura 8. Área de estudio.

Como base topográfica se cuenta con un modelo digital del Terreno (MDT) de 12.7 x 26.4 Km con una resolución de 0.5 m que cubre parcialmente Ciudad del Este y la margen izquierda del río Paraná, desde la confluencia de los ríos Paraná y Acaray hasta la confluencia del río Paraná con el río Monday. El MDT se encuentra con referencia EPSG:32721 - WGS84 / UTM zona 21S (Figura 9).

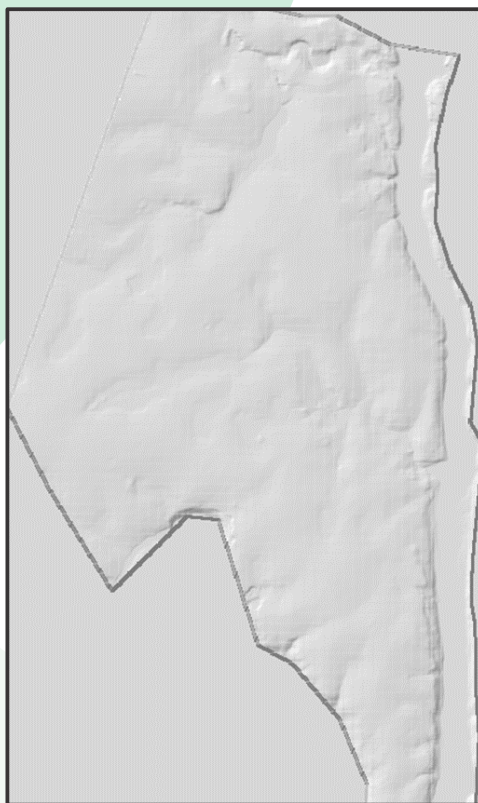


Figura 9. MDT de Ciudad del Este y Paraná.

Sin embargo, este MDT no contiene información batimétrica del cauce por lo que fue necesario desarrollar un MDT adicional que incluyera esta información vital para el objetivo del estudio.

Para desarrollar el MDT del terreno se utilizó un archivo de nubes de puntos de batimetría facilitado por UHE Itaipú. Los MDT coinciden en su datum vertical por lo que no fue necesaria ninguna ulterior corrección. La nube de puntos cuenta con una resolución de 5x5 m por lo que el MDT de cauce se obtuvo con esta misma resolución. Posteriormente, el procesamiento y desarrollo del MDT del cauce se llevó a cabo en ambiente QGIS V3.1. EL MDT presenta algunas irregularidades localizadas, pero la magnitud de estas es despreciable en función de la sección y profundidad y no tienen efectos apreciables en el flujo por lo que el resultado se considera satisfactorio para la aplicación a la cual se dará uso (Figura 10).

Finalmente, la función de reconocimiento de múltiples MDT del HydroBID Flood evitó que se tuviera que desarrollar una integración de ambos MDT siendo únicamente necesario identificar el área de afectación de cada MDT dentro del modelo para que se tome en cuenta la respectiva topografía (Figura 11).

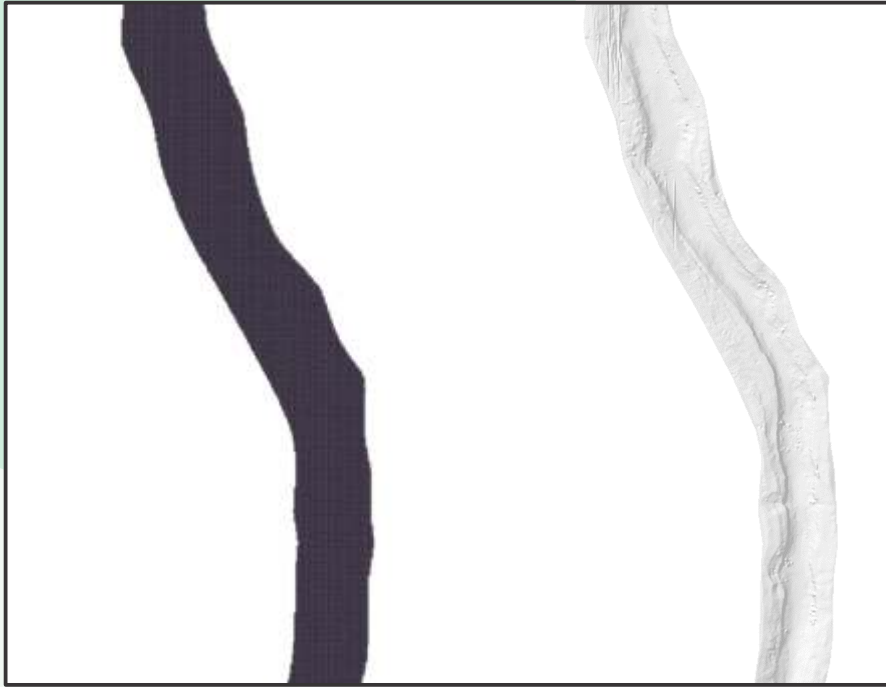


Figura 10. Nube de puntos batimétrica levantada por UHE Itaipú y MDT Finalizado para el cauce del río Paraná.



Figura 11. Detalle del MDT modificado del río Paraná en Ciudad del Este.

1.2. DATOS Y ELEMENTOS DEL DISEÑO

a. Data Hidrométrica

La información necesaria para la calibración y ejecución de las simulaciones se obtuvo gracias al aporte de UHE Itaipú quienes facilitaron los datos existentes de la estación hidrométrica ubicada en el puente de la Amistad; la información disponible se detalla en la tabla 4.

Tabla 4. Disponibilidad de información Hidrométrica para el río Paraná.

Dato	Fuente	Período	Observaciones
Datos históricos nivel y caudal diario del río Paraná	UHE Itaipú	1999 -2015	-
Curva llave del río Paraná		-	-
Niveles y caudales horario del río Paraná		2016 - 2020	Datos completos
Estudios hidrológicos del río Paraná		-	Estudios hidrológicos e hidráulicos del río Paraná, aguas abajo de la presa UHE Itaipú

Para fines de calibración y simulación, se han utilizado los caudales y niveles medidos en la estación del Puente de la Amistad (Figura 12) para el año 2013 (Figura 13), ya que es el único año disponible con datos completos y continuos que concuerdan con la información de niveles.



Figura 12. Mapa de ubicación de la condición de contorno y el punto de descarga de efluentes.

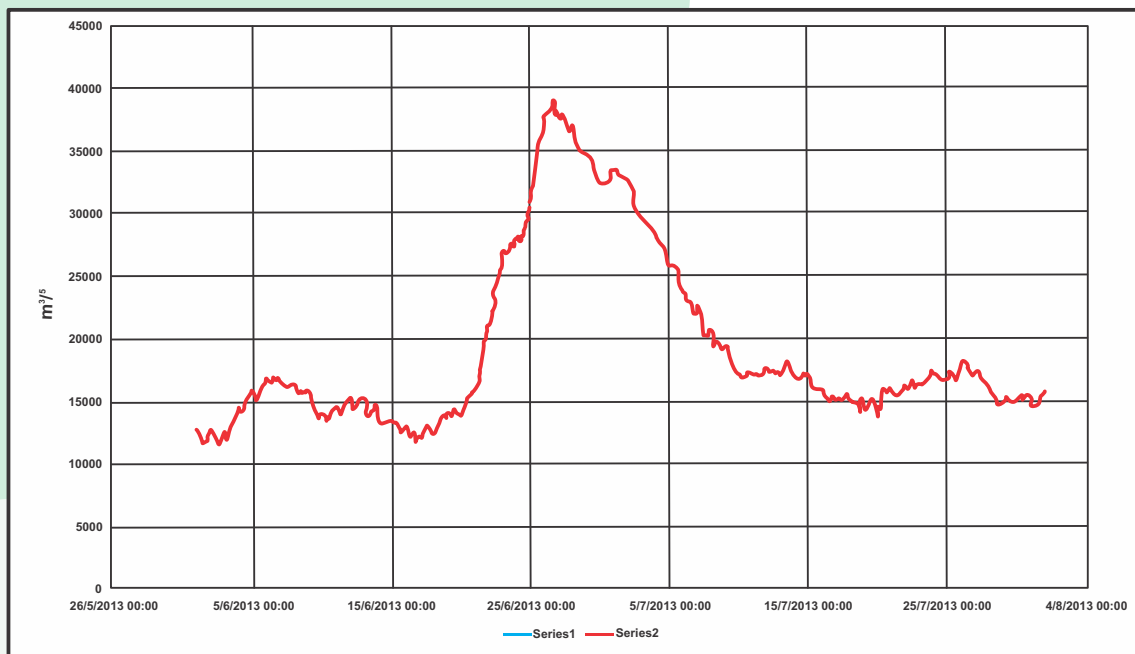


Figura 13. Serie Temporal de caudales para el año 2013 en Puente de la Amistad.

b. Características de la Descarga

La PTAR se desarrollará en 2 etapas:

- **Obra de 1° Etapa:** se prevé una Planta solamente con Pretratamiento (Desbaste + Desarenado/Desengrasado) previo a la descarga vía Emisario subfluvial. Por ende, se supone que la eficiencia en remoción de DBO y SST es nula, para estar del lado de la seguridad. Tampoco se prevé desinfección previa a la descarga. Por lo cual, para esta etapa, las cargas (para cada parámetro) en el efluente (descarga al río) coinciden con las Cargas en el afluente.
- **Obra de 2° Etapa:** aquí se prevé que se construya una etapa de tratamiento primario y secundario, pero no se ejecutará en este predio donde se construyen las obras de 1° Etapa. Por lo cual, para este Emisario que estamos proyectando, solamente se debería realizar una verificación del impacto de la descarga en el río suponiendo que la Planta de Tratamiento a futuro (Primario y Secundario) sale de servicio, es decir, si se realiza solamente el Pretratamiento en la Planta que estamos proyectando por lo que todo el vertido saldría por el emisario. Esta verificación con los caudales de 2° Etapa nos estaría dando la pauta sobre qué pasaría a futuro si no se construye la otra etapa de tratamiento.

En el ingreso a la Planta se instalará una Estación de Bombeo. Los Caudales de diseño hidráulico de la Planta, para cada Etapa (máximos y mínimos) se observan en la tabla 5.

Tabla 5. Caudales de Bombeo PTAR Ciudad del Este.

Caudal de Bombeo de la PTAR	Unidades	Año 0	1° Etapa	2° Etapa
N° de bombas totales	N°	2	3	3
N° de bombas totales en funcionamiento	N°	1	2	2
Caudal unitario bomba	L/s	327	327	466
Caudal total de bombeo	L/s	327	654	932
Caudal mínimo de bombeo	L/s	327	327	466

En la tabla 6 se presentan los valores para los parámetros característicos del líquido afluente que se analizó durante este estudio. Los valores asumidos provienen de los parámetros utilizados para el diseño de los emisarios. Los parámetros analizados fueron Demanda de Biológica de Oxígeno (DBO), Demanda Química de Oxígeno (DQO), Sólidos Suspendidos Totales (SST), Nitrógeno Total (como NTK), Coliformes Fecales y Fósforo Total (P).

Tabla 6. Caracterización de líquido afluente.

Parámetro	Unidades	Valor
DBO Total	mg/l	250
DQO	mg/l	475
Sólidos Suspendidos Totales (SST)	mg/l	250
Nitrógeno Total (NTK)	mg/l	25
Coliformes Fecales	NMP/100 mg/l	1.5E+07
Fósforo (P)	mg/l	4

1.3. APLICACIÓN DE HYDROBID FLOOD

a. Implementación y Caracterización del Modelo

La primera fase de todo modelo hidrodinámico es la selección y delimitación del área de estudio en donde se ubica la zona de interés, denominada dominio de cálculo. El dominio de cálculo debe definirse de tal manera que permita representar correctamente la dinámica a analizar sin extenderse innecesariamente, manteniendo una relación entre la ubicación de las condiciones de contorno y la zona de interés. Las condiciones de contorno deben estar suficientemente alejadas de la zona de interés de modo a garantizar que las condiciones de flujo no estén influenciadas por las posibles irregularidades numéricas que pueden ocurrir en las zonas incorporación o extracción de caudales.

Para el caso del río Paraná, debido al cauce perfectamente demarcado y a que al simular hidrodinámica de aguas bajas no existen áreas en donde se pueden presentar desbordes de las márgenes se elaboró un dominio de cálculo concentrado únicamente en el cauce del río (Figura 14). El dominio de cálculo se desarrolló para 12 km de longitud, lo que permite un análisis detallado de las plumas de contaminación simuladas

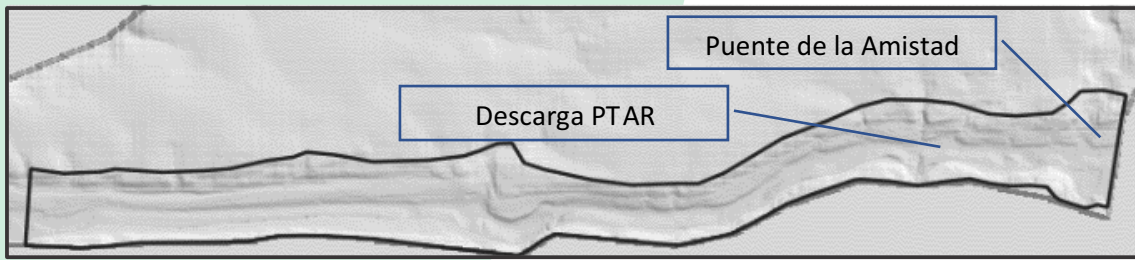


Figura 14. Dominio de Cálculo.

Debido a que la sección promedio del río Paraná en la zona de interés presenta un ancho superior a los 200 m, sin presentar cambios batimétricos o topográficos importantes, se desarrolló una malla de cálculo con una densidad externa de 50 m, que es suficiente para hacer seguimiento de la hidrodinámica del río, con una densificación de mallado de 5 m, en la zona central del cauce en donde se ubica la descarga de la PTAR, lo que permite un detalle suficiente para analizar las concentraciones de los parámetros a analizar. Con la caracterización establecida se obtuvo un mallado formado por 26.696 elementos de cálculo (Figura 15 y 16).

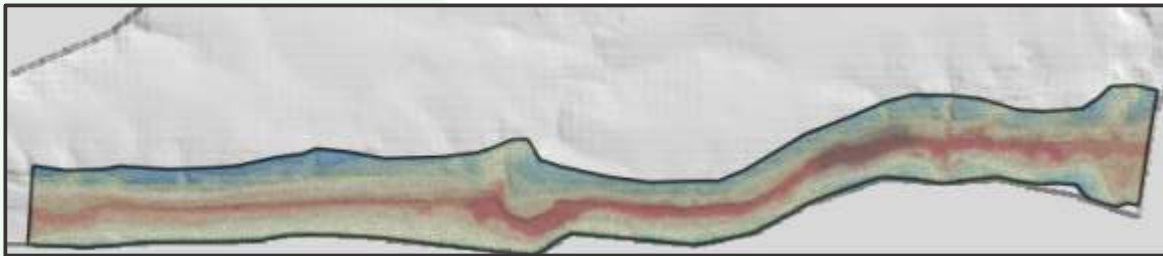


Figura 15. Malla de Cálculo.

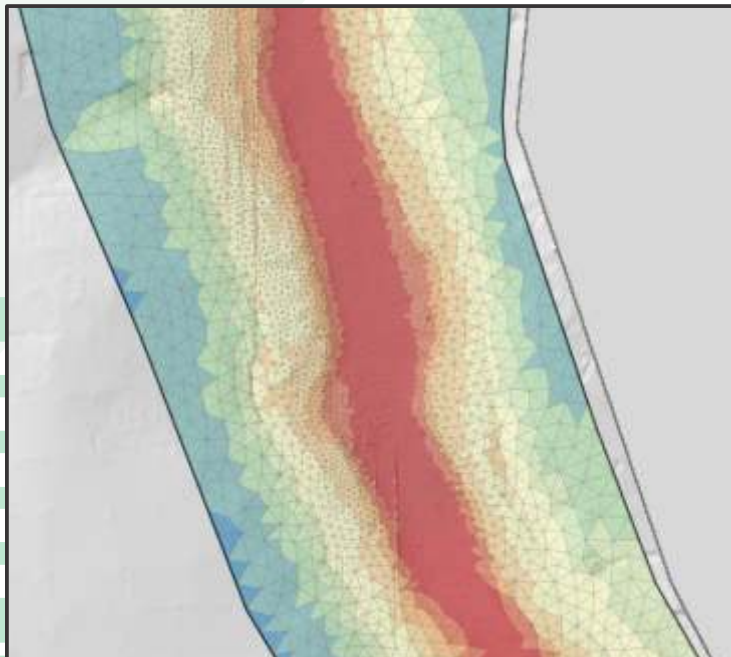


Figura 16. Detalle de la Malla de Cálculo en la zona de descarga de la PTAR.

Se incluyeron 2 condiciones de contorno:

- Aguas Arriba (Condición de entrada): se incorporan las series temporales de caudal vs. tiempo.
- Aguas Abajo (Condición de salida): se asume flujo uniforme.

Se utilizó un coeficiente de rugosidad, n de Manning inicial de 0.04, uniforme a todo lo largo del dominio de cálculo, proveniente de estudios de simulación realizados por UHE Itaipú con el modelo HEC-RAS 1D.

Antes de iniciar el proceso de simulación es necesario realizar el proceso de calibración, esto para garantizar que las características del modelo son compatibles con las características reales de la zona de estudio. En modelos hidrodinámicos, asumiendo que la topografía y batimetrías son correctas, la calibración se realiza modificando el coeficiente de rugosidad de n de Manning hasta que se logre un ajuste satisfactorio entre la variable de calibración medida y simulada (normalmente profundidad o nivel de superficie libre).

Para el proceso de calibración del modelo del río Paraná se ha utilizado una serie temporal de 48 horas para el período de aguas bajas (Figura 17). El proceso de ajuste se llevó a cabo comparando los resultados obtenidos por el modelo con las mediciones de niveles reportadas en la estación hidrográfica del Puente de la Amistad.

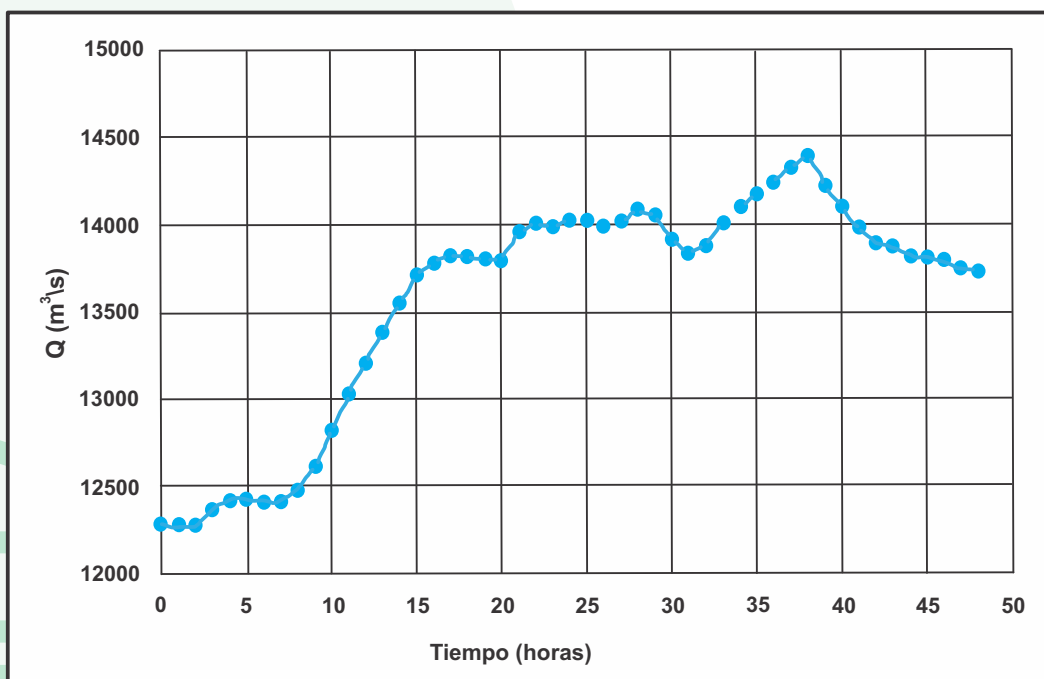


Figura 17. Serie de caudales de 48 horas para período de estiaje (Aguas Bajas).

Al final del proceso iterativo, el mejor ajuste del parámetro n de Manning se logró para un coeficiente de rugosidad n de Manning igual a 0.041 (Figura 18), lográndose un ajuste que se considera satisfactorio para la finalidad de este estudio (Figura 19).

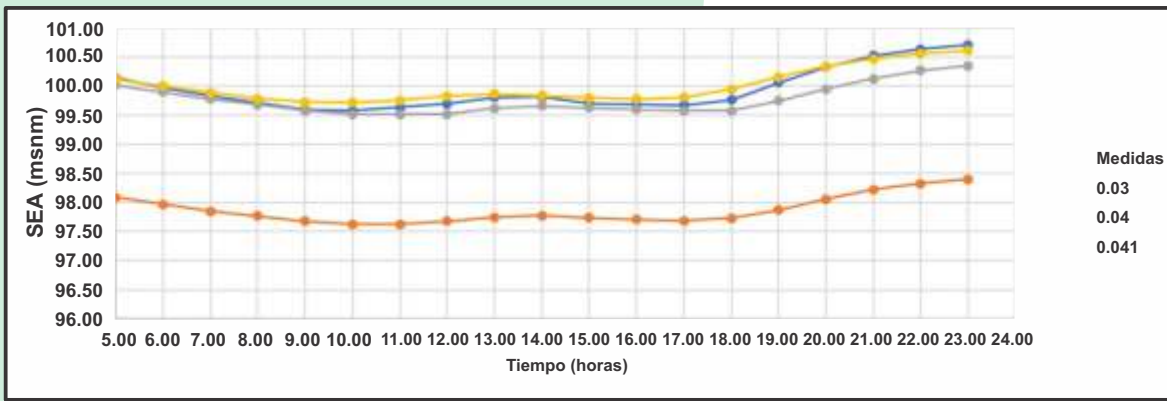


Figura 18. Niveles de la superficie hídrica para distintos coeficientes de rugosidad vs. niveles de superficie hídrica medida.

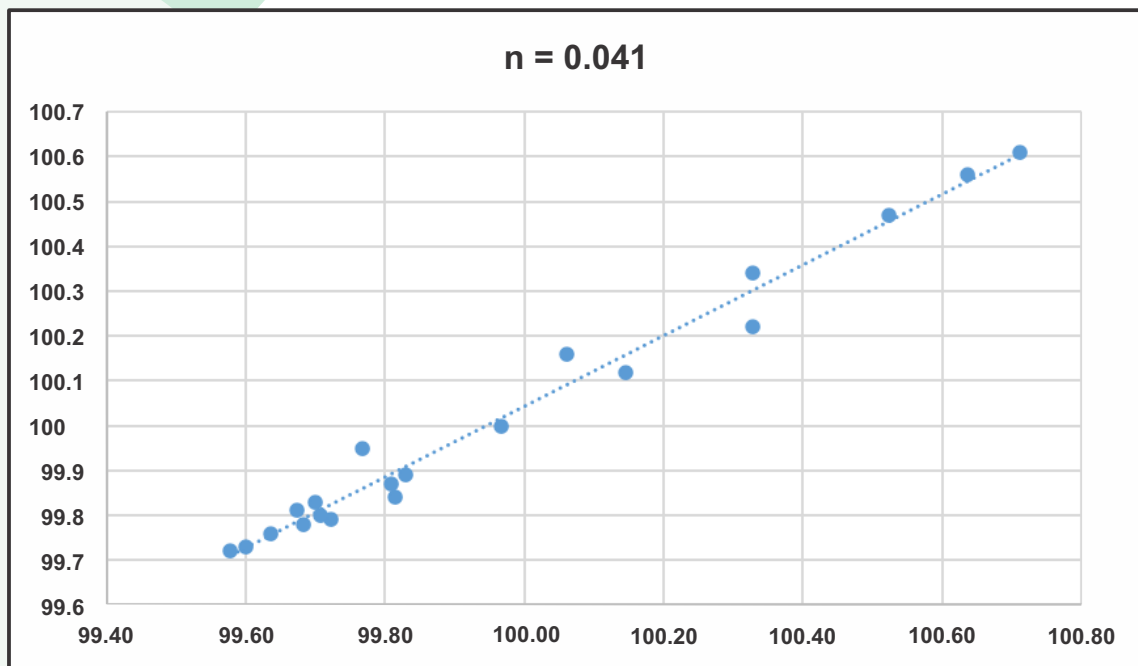


Figura 19. Nivel de ajuste de la data monitoreada vs. simulada para $n = 0.041$.

b. Escenarios y Resultados de las Simulaciones

Previo a la simulación de los escenarios de descarga se realizó la verificación de trazado y ubicación del emisario y número de difusores mínimos necesarios. Esta verificación se llevó a cabo con la condición hidráulica de diseño, es decir, los caudales en condición de estiaje, debido a que esta representa la condición hidráulica más desfavorable.

Debido a las características batimétricas e hidráulicas del río Paraná, en la zona de ubicación de la PTAR, el emisor se ha ubicado en el centro del cauce, en donde se tienen las mejores condiciones para la mezcla (profundidad y velocidad), tal y como se observa en la Figura 12. Durante el proceso también se ha identificado, que, debido a las características indicadas

anteriormente, una descarga con difusor único es más que suficiente para esta PTAR. Adicionalmente esta verificación permitió descartar la realización de escenarios con aguas medias y altas por no ser necesarios, ya que tal y como se observa en los resultados de los escenarios la capacidad de mezcla del río Paraná en aguas bajas es más suficiente como para garantizar la calidad de agua, aguas abajo de la zona de ubicación de la PTAR.

Para la simulación de las descargas se utilizó una serie temporal de 10 horas para condición de estiaje (Figura 17) y se han utilizado, para cada parámetro, las concentraciones que se identifican en la Tabla 6. Se han simulado 10 horas porque en ese tiempo se garantiza el completo desarrollo de la pluma de contaminación para cada parámetro.

Cabe resaltar que no se cuentan con datos relativos a los coeficientes de dispersión lateral y longitudinal del cauce del río Paraná en la zona de proyecto, tampoco se cuenta con mediciones para estimar los coeficientes de decaimiento de los parámetros analizados. Sin embargo, estos parámetros tienen un efecto limitado y son útiles principalmente para analizar la capacidad de reacción y estudiar el decaimiento de las concentraciones en el espacio y tiempo lo cual no era el objetivo de este análisis, razón por la que se considera que no representan una limitación a considerar.

Para estimar los coeficientes de dispersión se utilizaron las fórmulas de Fisher¹² para canales abiertos según la cuales:

$$\text{Dispersión Longitudinal: } DL=5.93dfU^2$$

$$\text{Dispersión Transversal: } DT=0.067WU^2$$

Donde U es la velocidad media, W es el ancho de la sección transversal, d es la profundidad, S es la pendiente longitudinal y g es la aceleración de la gravedad.

Los valores necesarios para la estimación de estos coeficientes se obtuvieron de valores medios obtenidos a partir de la simulación hidrodinámica realizada con HydroBID Flood obteniéndose los siguientes valores:

$$DL = 38.85 \text{ m}^2/\text{s}$$

$$DT = 0.43 \text{ m}^2/\text{s}$$

Una vez obtenidos los coeficientes de dispersión a partir de las simulaciones hidrodinámicas del cauce, se procedió a simular 6 escenarios. Para cada uno de estos se utiliza el caudal de bombeo respectivo de cada etapa durante 10 horas, obteniéndose la pluma de contaminación y generándose una tabla en la que presentan los valores de concentración máximos registrados en el punto de emisión para cada parámetro. Estos valores son los que se utilizan para realizar las comparaciones con las normas vigentes. Adicionalmente se incluyen la longitud y ancho de la pluma para estos valores máximos para ilustrar que el efecto es confinado al centro del canal y por distancias relativamente cortas.

12. River Mixing, J.C. Rutherford, 1994, Wiley.

Para la estimación del número de difusores en el emisario se procedió a simular partiendo de un único difusor. Si las concentraciones obtenidas durante las simulaciones de diseño hubieran resultado fuera de norma para las condiciones de diseño se hubiera procedido a aumentar el número de difusores hasta que se consiga una condición favorable. En el caso de la PTAR de Ciudad del Este este proceso iterativo no fue necesario debido a las condiciones hidrológicas e hidráulicas del río Paraná.

A continuación, se presentan los escenarios simulados, que se basan en las etapas de proyecto que se presentaron en la tabla 5.

Escenario 1: Año 0

Para este escenario se utilizó un caudal de bombeo de 327 l/s (Tabla 5) constante durante las 10 horas de simulación.

Los valores máximos de concentración obtenidos para las plumas de contaminación, en el punto de descarga, en esta fase, se presentan en la tabla 7.

Tabla 7. Características máximas de la pluma de contaminación en el río Paraná para E1-Año 0.

Parámetro	Longitud de la Pluma (m)	Ancho de la Pluma (m)	Valor Máximo
DBO Total	322	63	0.0234 mg/l
DQO	263	54	0.0445mg/l
Sólidos Suspendidos Totales (SST)	119	39	0.0234 mg/l
Nitrógeno Total (NTK)	132	35	0.0023 mg/l
Coliformes fecales	242	60	1405 NPM/100ml
Fósforo (P)	290	69	0.004 mg/l

Todos los parámetros simulados cumplen con las condiciones de descarga (Ley 1614/00) y calidad en cuerpo receptor (Resolución 222/02).

Las plumas de contaminación por parámetro se pueden observar en las Figuras 20 a la 25.



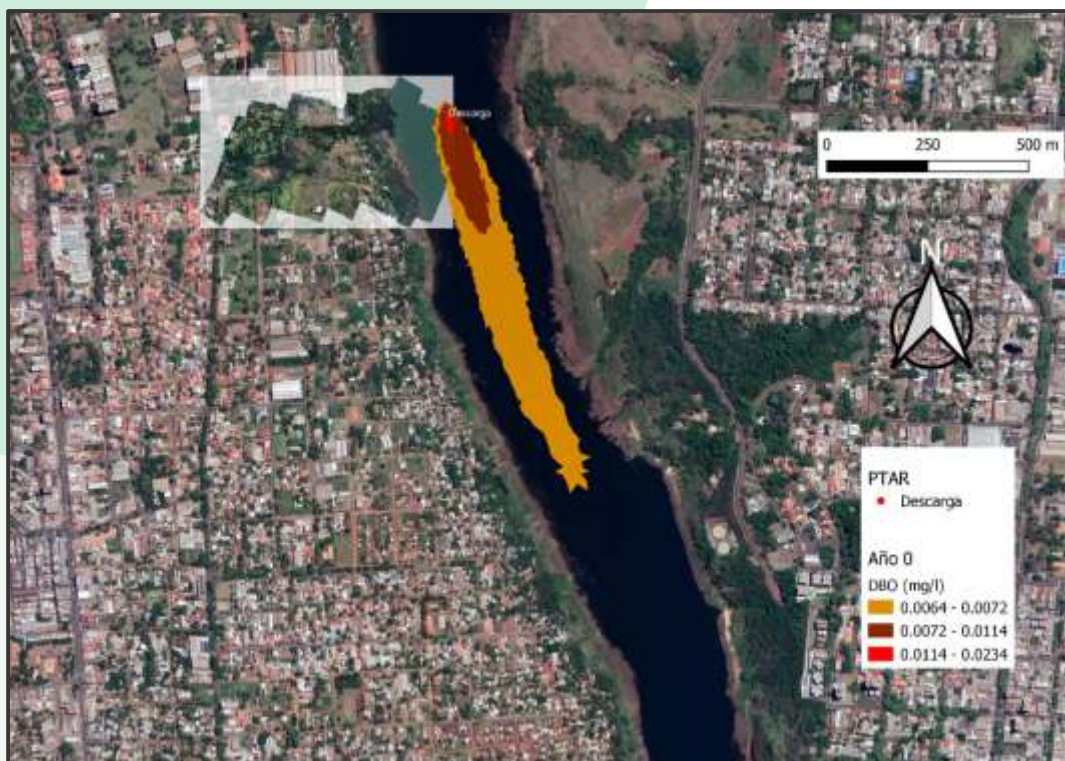


Figura 20. Pluma de contaminación para DBO en PTAR CDE para el escenario 1.



Figura 21. Pluma de contaminación para DQO en PTAR CDE para el escenario 1.



Figura 22. Pluma de contaminación para SST en PTAR CDE para el escenario 1.



Figura 23. Pluma de contaminación para NTK en PTAR CDE para el escenario 1.

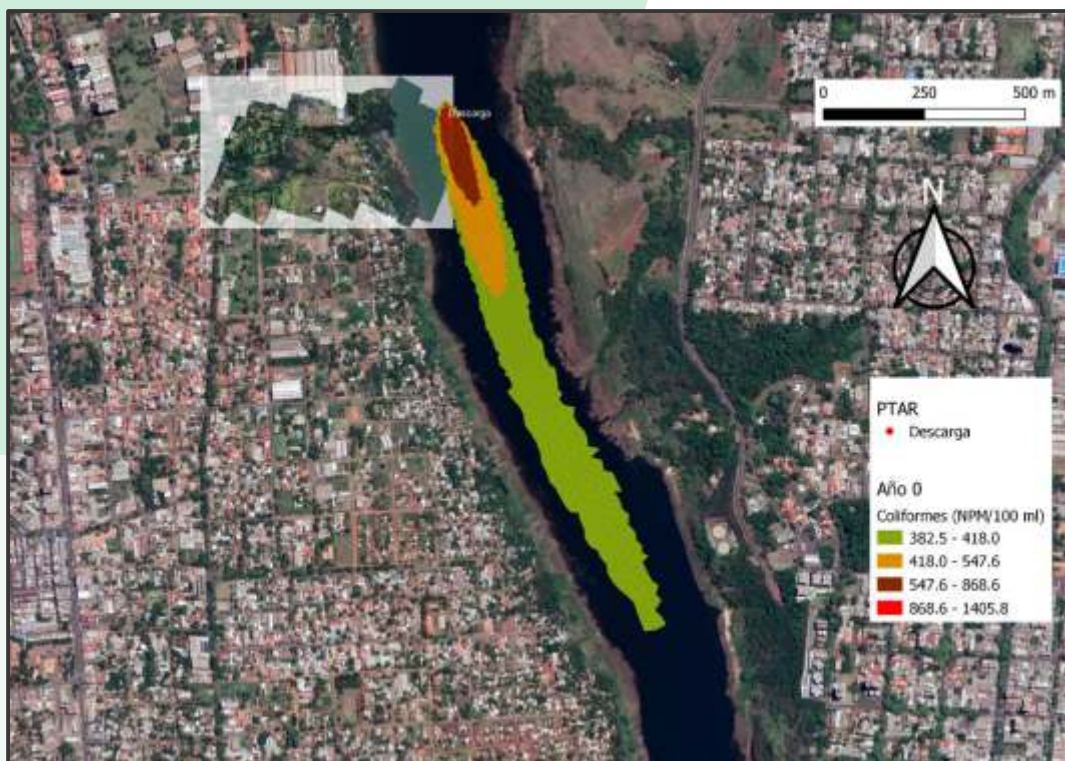


Figura 24. Pluma de contaminación para Coliformes Fecales en PTAR CDE para el escenario 1.



Figura 25. Pluma de contaminación para Fósforo en PTAR CDE para el escenario 1.

Escenario 2: 1° Etapa

Para este escenario se utilizó un caudal de bombeo de 654 l/s constante durante 10 horas de simulación.

Los valores máximos de concentración obtenidos para las plumas de contaminación (en el punto de descarga), en esta fase, se presentan en la tabla 8.

Tabla 8. Características máximas de la pluma de contaminación en el río Paraná para E2-Etapa1.

Parámetro	Longitud de la Pluma (m)	Ancho de la Pluma (m)	Valor Máximo
DBO Total	123	43	0.0466 mg/l
DQO	337	76	0.0886mg/l
Sólidos Suspendidos Totales (SST)	99	35	0.0466 mg/l
Nitrógeno Total (NTK)	316	68	0.0047 mg/l
Coliformes fecales	317	74	2797 NPM/100ml
Fósforo (P)	164	45	0.0007 mg/l

Todos los parámetros simulados cumplen con las condiciones de descarga (Ley 1614/00) y calidad en cuerpo receptor (Resolución 222/02).

Las plumas de contaminación por parámetro se pueden observar en las figuras 26 a la 31.



Figura 26. Pluma de contaminación para DBO en PTAR CDE para el escenario 2.



Figura 27. Pluma de contaminación para DQO en PTAR CDE para el escenario 2.



Figura 28. Pluma de contaminación para SST en PTAR CDE para el escenario 2.



Figura 29. Pluma de contaminación para NTK en PTAR CDE para el escenario 2.



Figura 30. Pluma de contaminación para Coliformes Fecales en PTAR CDE para el escenario 2.



Figura 31. Pluma de contaminación para Fósforo en PTAR CDE para el escenario 2.

Escenario 3: 2° Etapa

Para este escenario se utilizó un caudal de 932 l/s constante durante 10 horas de simulación.

Se recuerda que el objetivo de simular esta etapa era el de identificar el impacto de la descarga en el río suponiendo que la Planta de Tratamiento a futuro (Primario y Secundario) sale de servicio y la totalidad del caudal es vertido a través del emisor.

Los valores máximos de concentración obtenidos para las plumas de contaminación (en el punto de descarga), en esta fase, se presentan en la tabla 9.

Tabla 9. Características máximas de la pluma de contaminación en el río Paraná para E3-Etapa2.

Parámetro	Longitud de la Pluma (m)	Ancho de la Pluma (m)	Valor Máximo
DBO Total	311	69	0.0662 mg/l
DQO	129	44	0.1257mg/l
Sólidos Suspendedos Totales (SST)	281	66	0.0662 mg/l
Nitrógeno Total (NTK)	233	61	0.0066 mg/l
Coliformes fecales	140	48	3969 NPM/100ml
Fósforo (P)	132	47	0.11 mg/l

Todos los parámetros simulados cumplen con las condiciones de descarga (Ley 1614/00) y calidad en cuerpo receptor (Resolución 222/02). Solo se observa una pluma de coliformes fecales ligeramente superior a la norma, pero contenida en el centro del canal y por una distancia inferior a los 2 km. Más allá de esta distancia y cerca de las márgenes los valores cumplen con la normativa.

Las plumas de contaminación por parámetro se pueden observar en las figuras 32 a la 37.



Figura 32. Pluma de contaminación para DBO en PTAR CDE para el escenario 3.





Figura 33. Pluma de contaminación para DQO en PTAR CDE para el escenario 3.



Figura 34. Pluma de contaminación para SST en PTAR CDE para el escenario 3.



Figura 35. Pluma de contaminación para NTK en PTAR CDE para el escenario 3.

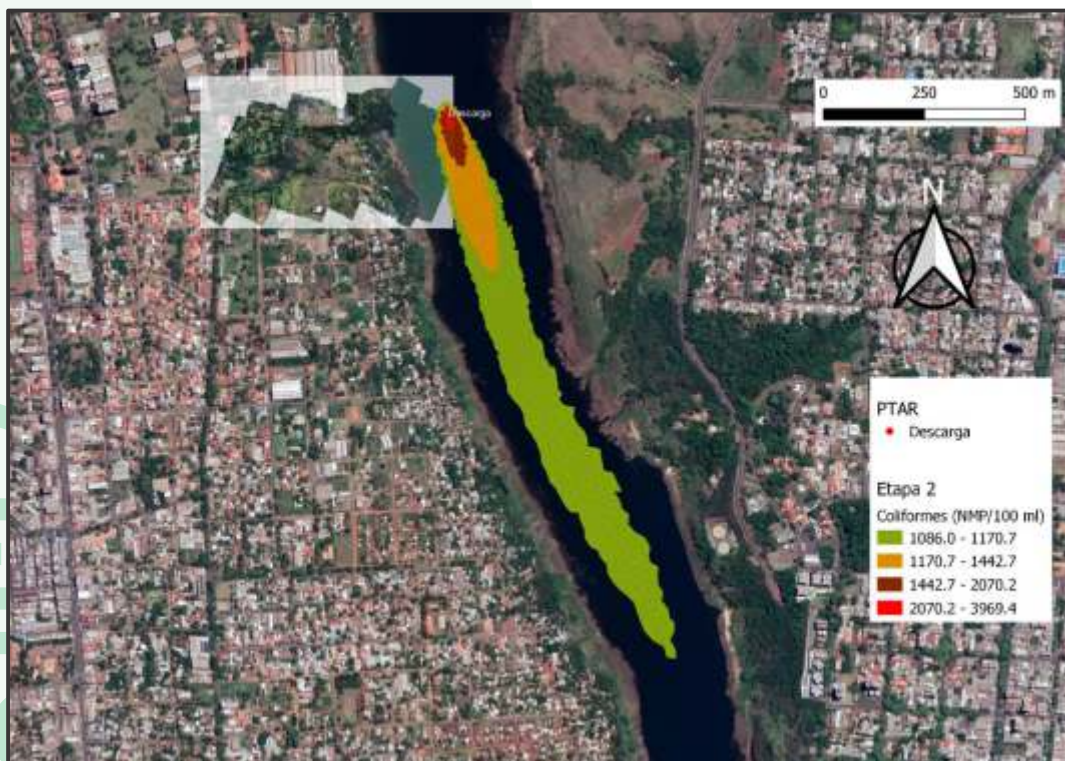


Figura 36. Pluma Pluma de contaminación para Coliformes Fecales en PTAR CDE para el escenario 3.



Figura 37. Pluma de contaminación para Fósforo en PTAR CDE para el escenario 3.

1.4. ANÁLISIS DE LOS RESULTADOS

Una vez finalizadas las simulaciones se puede llegar a las siguientes conclusiones:

- En función a los datos disponibles, para el diseño presentado y al comparar con la normativa vigente paraguaya para la descarga, la operación de la PTAR no representará un riesgo ambiental para el cauce del río Paraná en Ciudad del Este. En este sentido en la Tabla 10 se puede observar que todos los parámetros se encuentran por debajo de los límites establecidos por la Ley 1614/00.

Tabla 10. Verificación de vertido con los límites de calidad para descargas de efluentes (Ley 1614/00) en el río Paraná para Año 0, ETAPA 1 y ETAPA 2.

Parámetro	Unidades	Descarga a Colectoras	Descarga con tratamiento primario	Descarga con tratamiento secundario	Año 0	Etapa 1	Etapa 2
DBO Total	mg/l	250	<120	<50	0.0234	0.0466	0.0662
DQO	mg/l	600	<310	<50	0.0445	0.0886	0.1257
Sólidos Suspendedos Totales (SST)	mg/l	500	<100	<80	0.0234	0.0466	0.0662
Nitrógeno Total (NTK)	mg/l	-	-	-	0.0023	0.0047	0.0066
Coliformes Fecales	NMP/100 mg/l		<4000	<4000	1405	2797	3969
Fósforo	mg/l	-	-	-	0.004	0.0007	0.0011

- La conclusión anterior es incluso válida ante la posibilidad de falla en condiciones de operación final (932 l/s), esto debido a las condiciones batimétricas e hidráulicas favorables del cauce del río Paraná en el área de proyecto.
- En función a los datos disponibles, para el diseño presentado y al comparar con la normativa vigente paraguaya para la calidad de las aguas (Resolución 222/02), si se asume como agua de clase 2, se observa que el único parámetro que sobrepasa los límites es el de coliformes fecales (CF). Sin embargo, en la zona de vertido no existen zonas recreativas ni se realizan ninguno de los otros usos preponderantes que definen a las aguas de clase 2. Las comparaciones pueden observarse en la tabla 11.

Tabla 11. Verificación de vertido vs. los límites de calidad en cuerpos receptores para agua clase 2 (Resolución 222/02) en el río Paraná.

Parámetro	Unidades	Valor Esperado	Año 0	Etapas 1	Etapas 2
DBO Total	mg/l	Hasta 5	0.0234	0.0466	0.0662
DQO	mg/l	Hasta 5	0.0445	0.0886	0.1257
Sólidos Suspendidos Totales (SST)	mg/l	-	0.0234	0.0466	0.0662
Nitrógeno Total (NTK)	mg/l	Hasta 0.6	0.0023	0.0047	0.0066
Coliformes Fecales	NMP/100 mg/l	Hasta 1000	1405	2797	3969
Fósforo	mg/l	Hasta 0.05	0.004	0.0007	0.0011

- Sin embargo, es importante aclarar que estos valores de concentración elevados para CF ocurren en el punto de vertido, lo cual es de esperar y como se ve en la tabla 10, estos valores se encuentran siempre dentro de los límites previstos.
- Para el año 0, el valor de concentración para CF cae dentro de los valores admisibles para aguas de Clase 2, a aproximadamente a 14 m del vertido, mientras que para la Etapa 1 la concentración para CF cae dentro de los valores admisibles para aguas de Clase 2 a aproximadamente 150 m del punto de vertido.
- La Etapa 2, es la única que presenta valores elevados de concentración de CF que se mantienen en el espacio extendiéndose por más de 2 km. Sin embargo, se recuerda que esta no es una fase operativa sino la simulación del caso extremo en el que se presenta una falla total del sistema de tratamiento con vertimiento directo al cauce.
- En ningún momento, para ninguno de los casos se estiman concentraciones elevadas de CF cerca de las márgenes.
- El valor de CF está dentro de los márgenes admisibles si se considera la zona de vertido como agua de Clase 3.
- Se espera que adicionalmente la instalación de difusores reduzca ulteriormente las concentraciones de los parámetros en la zona de vertido. No obstante, este efecto no puede ser simulado por el HydroBID Flood ya que solo se simula dispersión longitudinal y lateral con concentración promediada en la vertical.

2. PTAR LAMBARÉ



2.1. ÁREA DE ESTUDIO Y TOPOGRAFÍA

El área de estudio comprende el tramo de aproximadamente 5.4 km aguas arriba desde la confluencia del río Paraguay con el arroyo Fortín de Villa Elisa. El área fue determinada en base a la disponibilidad de datos topográficos y batimétricos, sin embargo, se consideró suficiente para los fines del estudio. Como base topográfica se cuenta con un modelo digital del Terreno (MDT) de 12 x 15 km con una resolución de 0.5 m que cubre parcialmente el río Paraguay y la cuenca de Lambaré, desde la desembocadura de la Bahía de Asunción hasta la desembocadura de arroyo Fortín en Villa Elisa. El MDT se encuentra con referencia EPSG:32721 - WGS84 / UTM zona 21S (Figura 38).

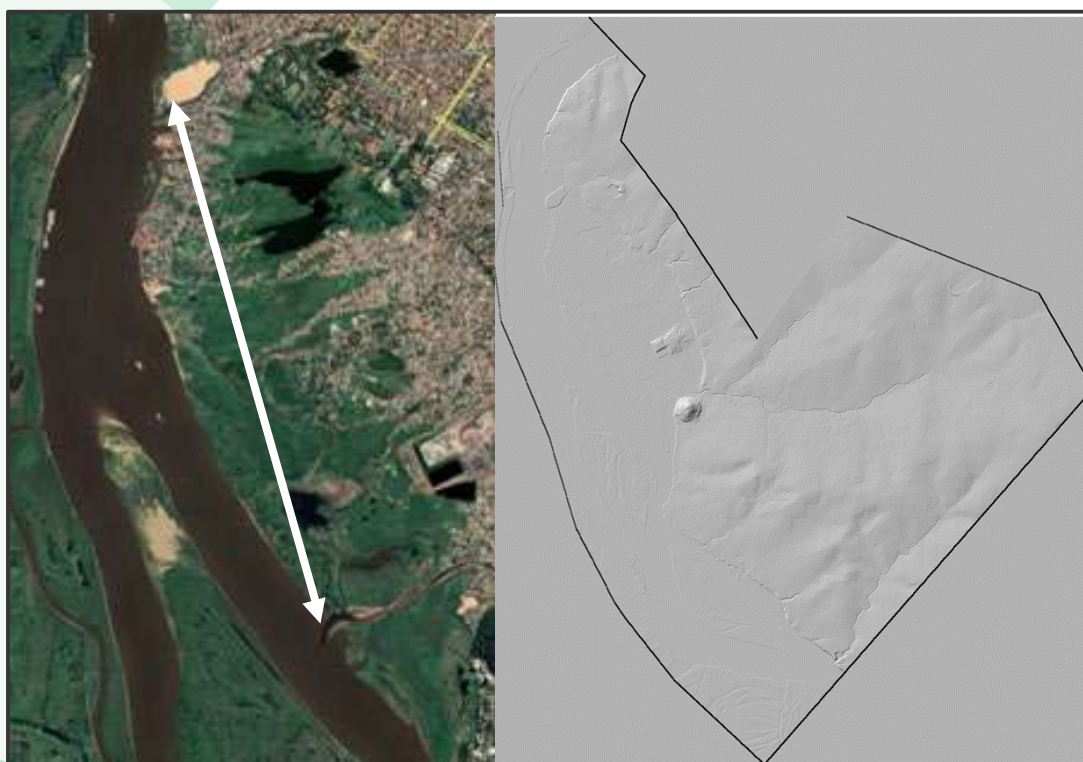


Figura 38. Área de estudio y Modelo Digital del Terreno.

Debido a que el MDT no contiene información batimétrica del cauce de Paraguay fue necesario desarrollar un MDT adicional que incluyera esta información vital para el objetivo del estudio.

Para desarrollar el MDT del terreno del cauce del Paraguay se utilizó un archivo vectorial (CAD) de curvas batimétricas a 1 m. El mapa batimétrico ocupa un área inferior al MDT que se extiende aproximadamente 2.7 km aguas arriba y aguas abajo de la zona de localización del proyecto de PTAR, lo que se considera aceptable para los fines del presente estudio. Ambos MDT coinciden en su datum vertical por lo que no fue necesaria ninguna ulterior corrección. El procesamiento y desarrollo del MDT final del cauce se llevó a cabo en ambiente QGIS V3.1 (Figura 39).

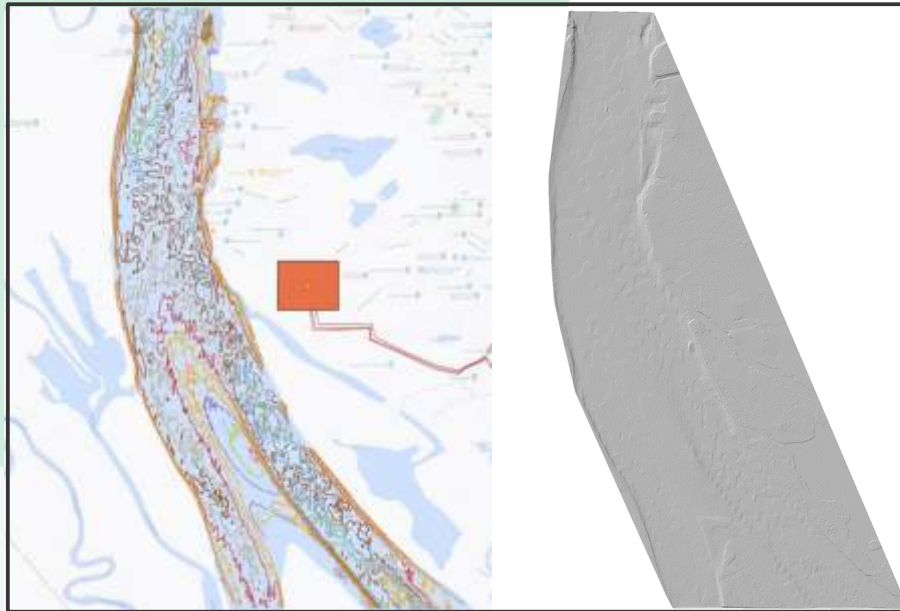


Figura 39. Nube de puntos batimétrica y MDT Final del Cauce del río Paraguay.

La función de reconocimiento de múltiples MDT del HydroBID Flood evitó que se tuviera que desarrollar una integración de ambos MDT (Figura 40) siendo únicamente necesario identificar el área de afectación de cada MDT dentro del modelo para que se tome en cuenta la respectiva topografía.

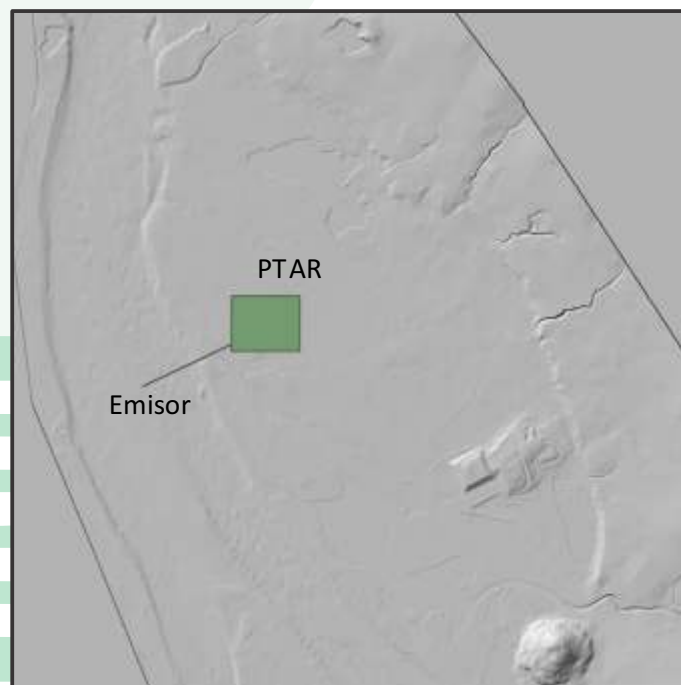


Figura 40. Detalle del MDT Total integrado del río Paraguay.

2.2. DATOS Y ELEMENTOS DE DISEÑO

a. Data Hidrométrica

La información necesaria para la calibración y ejecución de las simulaciones se obtuvo gracias al aporte del estudio de modelación de calidad del agua del río Paraguay de Angel Menéndez¹³. En este caso no se cuentan con series temporales, sin embargo, debido al tipo de comportamiento hidráulico del río Paraguay, se puede asumir que para el tiempo de simulación a utilizar (48 horas), el flujo es uniforme. La información disponible se detalla en la Tabla 12. Zona 21S (Figura 38).

Tabla 12. Disponibilidad de información Hidrométrica en el río Paraguay.

Escenario	Caudal (m ³ /s)	Nivel Absoluto Asunción (msnm)
Aguas Bajas	1.573	55,05
Aguas Medias	2.902	57,10
Aguas Altas	4.950	59,42

Adicionalmente para simular el escenario extremo de caudal mínimo histórico se ha utilizado como referencia el nivel absoluto medido en la estación hidrográfica Asunción (Figura 41), el 25 de octubre de 2020, de 53.49 msnm, lo que en el modelo representó un caudal de aproximadamente 600 m³/s.

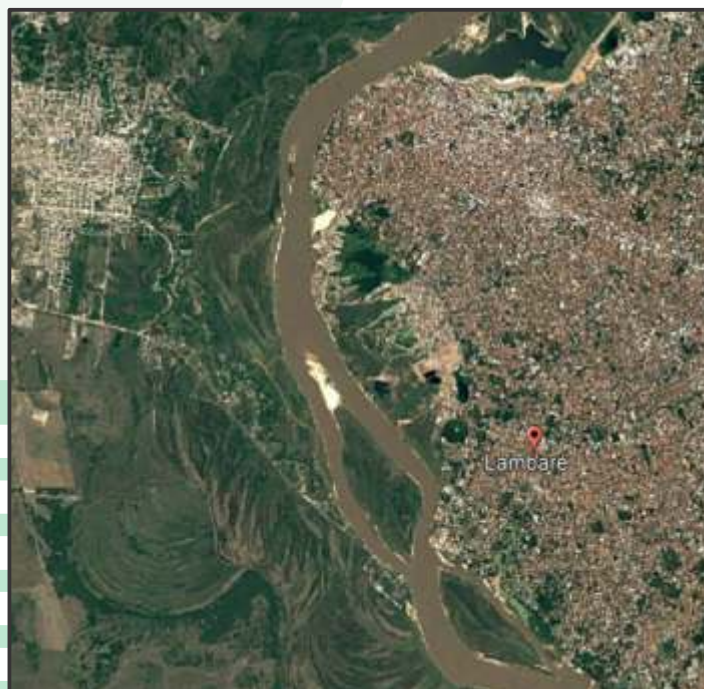


Figura 41. Ubicación de la estación hidrométrica Asunción.

13. Estudio de Modelado de la Calidad del Agua del Río Paraguay en Asunción y Área Metropolitana. Angel N. Menéndez, 2011. ESSAP.

Se ha utilizado como caudal de diseño el período de estiaje (aguas bajas), por ser la condición más desfavorable para los procesos de dispersión, y se han realizado escenarios de verificación para los períodos de aguas medias, altas y con el valor mínimo histórico en registro.

b. Características de la Descarga

La PTAR se desarrollará en 2 etapas:

- Año 0 y Obra de 1° Etapa: se prevé una Planta solamente con Pretratamiento (Desbaste + Desarenado/Desengrasado) previo a la descarga vía Emisario subfluvial. Por ende, se supone que la eficiencia en remoción de DBO y SST es nula, para estar del lado de la seguridad. Tampoco se prevé desinfección previa a la descarga. Por lo cual, para esta etapa, las cargas (para cada parámetro) en el efluente (descarga al río) coinciden con las Cargas en el afluente.
- Obra de 2° Etapa: se prevé que se construya una Etapa de tratamiento primario, secundario y de desinfección por lo que los afluentes se someterán a tratamiento completo y los parámetros serán los definidos por la norma. Esta etapa se utilizará únicamente para la verificación del impacto de la descarga en el río suponiendo que la Planta de Tratamiento a futuro (Primario y Secundario) sale de servicio. Esta verificación con los caudales de 2° Etapa daría la pauta sobre qué pasaría a futuro si no se construiría la otra etapa de tratamiento.

En el ingreso a la Planta se instalará una Estación de Bombeo. Los Caudales de diseño hidráulico de la Planta en l/s, para cada Etapa (máximos y mínimos) se observan en la Tabla 13.

Tabla 13. Caudales de Bombeo PTAR Lambaré (L/s).

Caudal de Bombeo de la PTAR	Unidades	Año 0	1° Etapa	2° Etapa
No de bombas totales	Nº	3	6	6
No de bombas totales en funcionamiento	Nº	2	4	4
Caudal unitario bomba	L/s	584,2	584,2	635,5
Caudal total de bombeo	L/s	1.168	2.337	2.542
Caudal mínimo de bombeo	L/s	584	1.168	1.271

En la tabla 14 se presentan los valores para los parámetros característicos del líquido afluente que se analizó durante este estudio. Los parámetros analizados fueron Demanda de Biológica de Oxígeno (DBO), Demanda Química de Oxígeno (DQO), Sólidos Suspendidos Totales (SST), Nitrógeno Total (como NTK), Fósforo Total (P), Coliformes Fecales (CF) y Aceites y Grasas.

Se han realizado simulaciones adicionales con concentraciones de coliformes fecales tanto para la condición inicial de operación sin desinfección ni tratamiento (año 0 y etapa 1) como para la eventual incorporación de desinfección en etapa 1; estos valores se encuentran en la tabla 15.

Tabla 14. Caracterización de líquido afluente.

Parámetro	Unidades	Valor
DBO Total	mg/l	300
DQO	mg/l	600
Sólidos Suspendedos Totales (SST)	mg/l	250
Nitrógeno Total (NTK)	mg/l	60
Fósforo (PO)	mg/l	15
Coliformes Fecales (con tratamiento)	NMP/100 mg/l	1.5E+05
Grasas y Aceites	mg/l	50

Tabla 15. Caracterización de adicional de coliformes fecales.

Parámetro	Unidades	Valor
Año 0 y Etapa 1 sin tratamiento	NMP/100 mg/l	1.5E+07
Etapa 1 con desinfección	NMP/100 mg/l	1.5E+06

2.3. APLICACIÓN DE HYDROBID FLOOD

a. Implementación y Caracterización del Modelo

Para este caso de estudio se contó con información para un tramo de 12 km con lo que se aseguró que las condiciones de contorno podían ubicarse de manera adecuada y no causarían un efecto adverso en el área de interés (punto de emisión).

Debido a las características topográficas y batimétricas del área de estudio no existen zonas de inundación en ninguna de las condiciones de flujo analizadas, por lo que se elaboró un dominio de cálculo concentrado únicamente en el cauce del Paraguay (Figura 42).

Dada a la complejidad del dominio de cálculo, debido a la presencia de barras centrales sobre la zona del cauce donde se encuentra el área de proyecto, se utilizó una malla de cálculo externa 20 m, de modo de tener una definición hidrodinámica adecuada a lo largo de toda la sección transversal, densificada a 10 m en la zona central del cauce en donde se ubica la descarga del emisario de la PTAR. El mallado generó un total de 21.672 elementos de cálculo lo cual permite tener una buena definición, dada la extensión de la sección transversal del río (Figura 43).



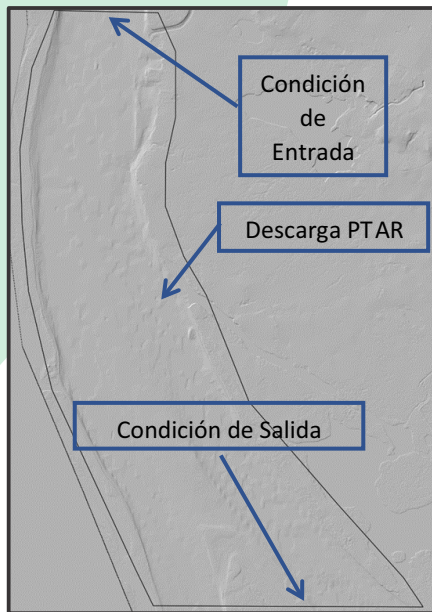


Figura 42. Dominio de Cálculo.

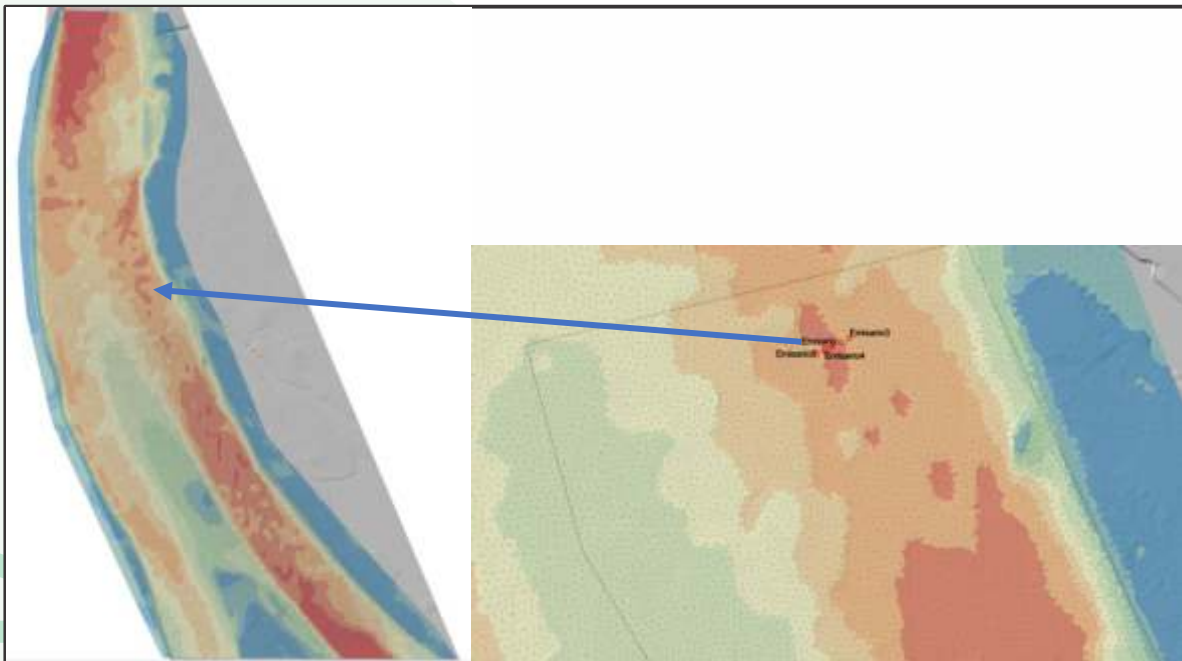


Figura 43. Malla de Cálculo y detalle en zona de ubicación de la descarga del emisor.

Se incluyeron 3 condiciones de contorno:

- Aguas Arriba: se incorporan las series temporales de caudal vs tiempo.
- Aguas Abajo: se asume flujo uniforme.
- Nivel inicial de superficie libre (condición inicial a lo largo del cauce).

La condición de flujo uniforme se obtuvo a partir de los niveles de superficie libre obtenidos directamente del MDT (Figura 36), dando una pendiente $S_o = 0.00005$.

El nivel de superficie libre inicial se asumió como 55 msnm (Figura 44). Esta condición de contorno se incluye para simplificar los tiempos de normalización de los caudales y de esta manera reducir considerablemente los tiempos de simulación. Los aportes de las descargas se incorporan cuando los caudales han logrado un régimen de flujo uniforme.

Se asumió un coeficiente de rugosidad, n de Manning inicial de 0.04.



Figura 44. Capa de superficie libre inicial de HydroBID Flood.

Para los fines de este estudio se ha utilizado el caudal para período de estiaje (Tabla 12), tanto para calibración como para simulación de diseño por ser el más desfavorable en términos de transporte de contaminantes.

- La calibración se ha realizado utilizando una serie temporal de 48 horas considerando un caudal de aguas bajas bajo régimen de flujo uniforme. El proceso de calibración tuvo un alto nivel de complejidad al no existir registros de niveles o caudales en la zona de proyecto. Debido a esto, para el proceso de calibración se han trasladado, a la zona de ubicación del emisor, los niveles absolutos de la estación hidrométrica Asunción (Figura 41). Este proceso se realizó bajo la hipótesis de que no existen desniveles ni controles hidráulicos considerables en esta parte del

cauce del río Paraguay, desde el punto de ubicación de la hidrométrica hasta el área de ubicación de la futura PTAR.

Al final del proceso de calibración se obtuvo un coeficiente de rugosidad, n de Manning, de 0.031.

El mismo proceso se ha utilizado para estimar el caudal equivalente a los niveles mínimos históricos del río Paraguay en base a los niveles absolutos medidos en la estación Asunción.

b. Escenarios y Resultados de las Simulaciones

Para la simulación de la descarga se utilizó una serie temporal de 48 horas, activando la descarga por un período de 24 horas a partir del momento en que el modelo se encuentra en régimen de flujo uniforme. Para la simulación de la descarga se han utilizado para cada parámetro las concentraciones que se identifican en las tablas 14 y 15.

Se descartó colocar la descarga en el centro del cauce, donde se encontraba inicialmente según proyecto, debido a la presencia de una isla central que en períodos de aguas bajas divide el cauce en 2 ramales. Por este motivo la descarga se ubicó en el ramal ubicado en la margen izquierda del Paraguay (Figura 45), por ser el que, según los datos de las simulaciones hidrodinámicas, presenta condiciones más favorables para la dispersión en cuanto a caudal, velocidad de flujo y profundidad.



Figura 45. Localización de la traza de ubicación del emisario de la PTAR Lambaré.

Posteriormente se llevó a cabo un proceso iterativo, siempre utilizando el nivel de aguas bajas para identificar el número de descargas óptimas del emisor que permitan mantener las concentraciones de la descarga a niveles inferiores a los indicados por la Resolución 222/02 y la Ley 1614/00. Al final de este proceso se identificó que el número óptimo era igual a 5 descargas (Figura 46), ubicadas a manera referencial con 10 m de separación cada una, debido a que para este número de descargas y para condiciones de diseño de la planta la operación completa de la planta (2da etapa) se obtienen valores de concentración por debajo de la norma para todos los parámetros analizados. Durante la verificación se obtuvo que, para los niveles de aguas bajas y medias del río Paraguay, independientemente del número de descargas, no se logra obtener una difusión tal que coloque los valores de descarga por debajo de los valores de la norma, y por esta razón no se justifica sobrediseñar el emisor.



Figura 46. Ubicación de las 5 zonas de descarga del emisor de la PTAR Lambaré.

Para este caso de estudio tampoco se cuentan con datos relativos a los coeficientes de dispersión lateral y longitudinal del cauce del río Paraguay en la zona de proyecto. Así mismo, no se tienen mediciones para estimar los coeficientes de decaimiento de los parámetros analizados. Sin embargo, estos parámetros tienen un efecto limitado y son útiles principalmente para analizar la capacidad de reacción y estudiar el decaimiento de las concentraciones en el espacio y tiempo lo cual no era el objetivo de este análisis, razón por la que no representan una limitación a considerar.

Para estimar los coeficientes de dispersión se utilizaron, al igual que para el caso de la PTAR de Ciudad del Este, las fórmulas de Fisher para canales abiertos.

Los valores necesarios para la estimación de estos coeficientes se obtuvieron de valores medios obtenidos a partir de las simulaciones hidrodinámicas realizadas con HydroBID Flood. Los valores se observan en la tabla 16.

Tabla 16. Coeficientes de Dispersión calculados para el río Paraguay en Lambaré.

Escenario	Unidades	Caudal (m ³ /s)	D _L	D _T
Aguas Mínimas	m ² /l	600	0,32	0,017
Aguas Bajas	m ² /l	1573	0,98	0,025
Aguas Medias	m ² /l	2902	1,45	0,028
Aguas Altas	m ² /l	4950	2,04	0,032

Para la identificación de parámetros de diseño de la PTAR se llevaron a cabo 12 simulaciones agrupadas en 6 escenarios que caracterizan cada una de las etapas de construcción y validación de la obra. Para cada uno de estos escenarios se obtuvo la pluma de contaminación y se generó una tabla en la que presentan los valores de concentración máximos registrados en el punto de emisión para cada parámetro, siendo estos valores los que se utilizan para realizar las comparaciones con las normas vigentes. En el caso en que los valores en la descarga superan los valores indicados por la resolución 222/02 para las aguas de Clase 2, se indica la distancia desde la descarga para la cual se llega a valores admisibles, el cual es un parámetro valioso para el análisis de los impactos de la PTAR en el río bajo diferentes escenarios.

Para las simulaciones de los escenarios se ha utilizado un período de 48 horas con un período de emisión de efluentes de 24 horas por parte del emisario, lo que permite el desarrollo completo de la pluma y dispersión del efluente.

Escenario 1: Simulación de condiciones iniciales (análisis para Año 0 y Etapa 1 en aguas bajas)

AÑO 0

Para este escenario se utilizó un caudal de 1.168 l/s constante durante 24 de las 48 horas de simulación en régimen de aguas bajas y se emplearon las concentraciones de coliforme fecales para descarga inicial sin tratamiento, con la finalidad de evaluar el efecto de la descarga en el río (Tabla 15).

Los resultados obtenidos para la pluma de contaminación para esta fase se presentan en la tabla 17.

Se puede observar que en el caso de coliformes fecales, se presentaron valores muy superiores a la Ley 1614/00 e incluso una pluma de contaminación que podría comprometer la margen izquierda del Paraguay aguas debajo de la PTAR.

Para el resto de los parámetros no se presentaron valores en la descarga superiores a los indicados en la Ley 1614/00 y las plumas se mantienen confinadas al canal.

Tabla 17. Características máximas de la pluma de contaminación en el río Paraguay para E1-Año 0.

Parámetro	Unidades	Concentración en la descarga	Longitud de la Pluma (m)	Concentración máxima de descarga (Ley 1614/00)	Longitud de la Pluma para cumplir R 222/02
DBO Total	mg/l	3,70	1	250	-
DQO	mg/l	7,39	2	600	32
Sólidos Suspendidos Totales (SST)	mg/l	3,08	1	500	-
Nitrógeno Total (NTK)	mg/l	0.74	1,5	-	-
Fósforo (P)	mg/l	0.18	2	-	-
Coliformes fecales	NMP/100 mg/l	123.175,93	349	-	cerca de las márgenes
Grasas y Aceites	mg/l	0.62	2	-	-

Las plumas de contaminación por parámetro se pueden observar en las figuras 47 a la 53.





Figura 47. Pluma de contaminación para DBO para el escenario 1, año 0 en la PTAR de Lambaré.



Figura 48. Pluma de contaminación para DQO para el escenario 1, año 0 en la PTAR de Lambaré.



Figura 49. Pluma de contaminación para Sólidos Suspendedos para el escenario 1, año 0 en la PTAR de Lambaré.



Figura 50. Pluma de contaminación para Nitrógeno para el escenario 1, año 0 en la PTAR de Lambaré.



Figura 51. Pluma de contaminación para Fósforo para el escenario 1, año 0 en la PTAR de Lambaré.



Figura 52. Pluma de contaminación para Coliformes Fecales para el escenario 1, año 0 en la PTAR de Lambaré.



Figura 53. Pluma de contaminación para Grasas y Aceite para el escenario 1, año 0 en la PTAR de Lambaré.

ETAPA 1

Se utilizó un caudal de bombeo de 2.337 l/s constante durante 24 de las 48 horas de simulación en régimen de aguas bajas.

Se emplearon las concentraciones de coliforme fecales para descarga inicial sin tratamiento con la finalidad de evaluar el efecto de la descarga controlada (Tabla 15).

Se puede observar que en el caso de coliformes fecales, se presentaron valores muy superiores a la Ley 1614/00 e incluso una pluma de contaminación que podría comprometer la margen izquierda del Paraguay aguas debajo de la PTAR.

Para el resto de los parámetros no se presentaron valores en la descarga superiores a los indicados en la Ley 1614/00 y las plumas se mantienen confinadas al canal.

Los resultados obtenidos para la pluma de contaminación (en el punto de descarga) para esta fase se presentan en la tabla 18.

Tabla 18. Características máximas de la pluma de contaminación en el río Paraguay para E1-Etapa 1.

Parámetro	Unidades	Concentración en la descarga	Longitud de la Pluma (m)	Concentración máxima de descarga (Ley 1614/00)	Longitud de la Pluma para cumplir R 222/02
DBO Total	mg/l	7,10	1	250	32
DQO	mg/l	14,20	8	600	270
Sólidos Suspendidos Totales (SST)	mg/l	5,92	5	500	-
Nitrógeno Total (NTK)	mg/l	1,42	4	-	-
Fósforo (P)	mg/l	0.35	3	-	-
Coliformes fecales	NMP/100 mg/l	236.637,59	243	-	cerca de las márgenes
Grasas y Aceites	mg/l	1.18	2	-	-

Las plumas de contaminación por parámetro se pueden observar en las figuras 54 a la 60.



Figura 54. Pluma de contaminación para DBO para, escenario 1, ETAPA 1 en la PTAR Lambaré.



Figura 55. Pluma de contaminación para DQO para, escenario 1, ETAPA 1 en la PTAR Lambaré.



Figura 56. Pluma de contaminación para Sólidos Suspendedos para, escenario 1, ETAPA 1 en la PTAR Lambaré.



Figura 57. Pluma de contaminación para Nitrógeno para, escenario 1, ETAPA 1 en la PTAR Lambaré.



Figura 58. Pluma de contaminación para Fósforo para, escenario 1, ETAPA 1 en la PTAR Lambaré.

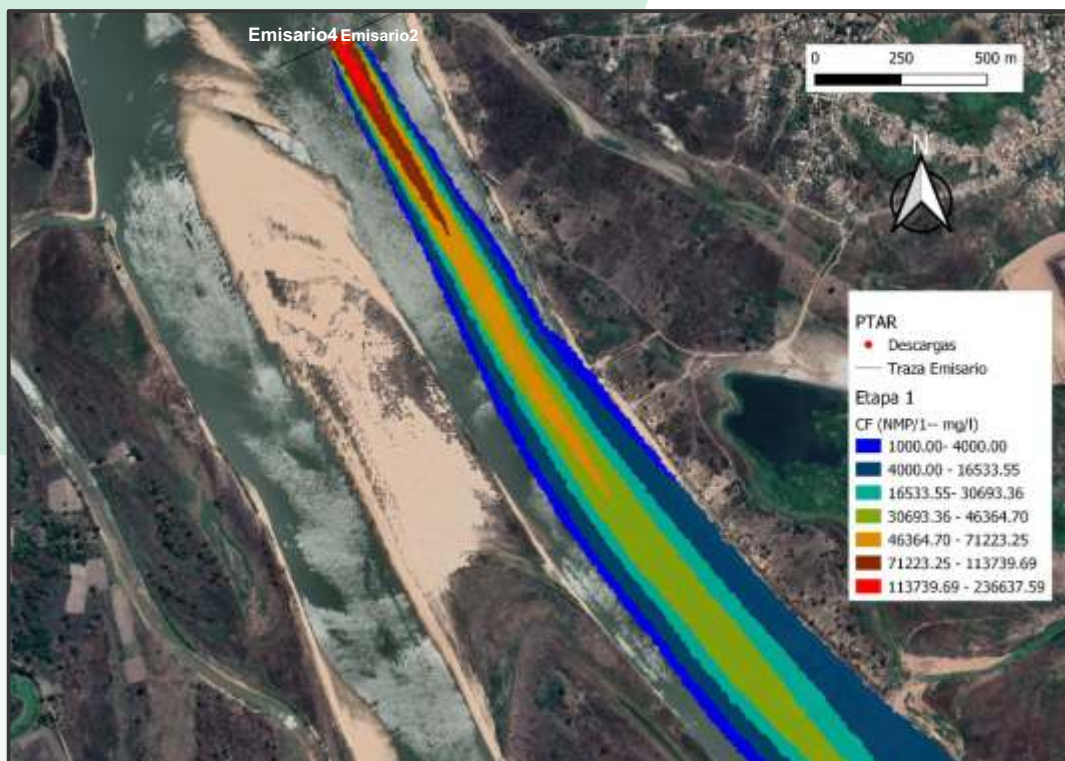


Figura 59. Pluma de contaminación para Coliformes Fecales para, escenario 1, ETAPA 1 en la PTAR Lambaré.



Figura 60. Pluma de contaminación para Fósforo para, escenario 1, ETAPA 1 en la PTAR Lambaré.

Escenario 2: Simulación de verificación (análisis para Año 0 y Etapa 1 en aguas medias y altas)

AÑO 0 - Aguas Medias

Se utilizó un caudal de bombeo de 1.168 l/s constante durante 24 de las 48 horas de simulación en régimen de aguas medias.

No se presentaron valores en la descarga superiores a los indicados en la Ley 1614/00 y las plumas se mantienen confinadas al centro del canal.

Las plumas de contaminación por parámetro se pueden observar en las figuras 61 a la 67.



Figura 61. Pluma de contaminación para DBO para escenario 2, AÑO 0 – AM en PTAR Lambaré.



Figura 62. Pluma de contaminación para DQO para escenario 2, AÑO 0 – AM en PTAR Lambaré



Figura 63. Pluma de contaminación para Sólidos Suspendedos para escenario 2, AÑO 0 – AM en PTAR Lambaré.



Figura 64. Pluma de contaminación para Nitrógeno para escenario 2, AÑO 0 – AM en PTAR Lambaré



Figura 65. Pluma de contaminación para Fósforo para escenario 2, AÑO 0 – AM en PTAR Lambaré



Figura 66. Pluma de contaminación para Coliformes Fecales para escenario 2, AÑO 0 – AM en PTAR Lambaré.



Figura 67. Pluma de contaminación para Grasas y Aceite para escenario 2, AÑO 0 – AM en PTAR Lambaré.

Los resultados obtenidos para la pluma de contaminación para esta fase se presentan en la tabla 19.

Tabla 19. Características máximas de la pluma de contaminación en el río Paraguay para E2-Año 0-Aguas Medias.

Parámetro	Unidades	Concentración en la descarga	Longitud de la Pluma (m)	Concentración máxima de descarga (Ley 1614/00)	Longitud de la Pluma para cumplir R 222/02
DBO Total	mg/l	2,51	2	250	-
DQO	mg/l	5	1	600	-
Sólidos Suspendidos Totales (SST)	mg/l	2,09	1,5	500	-
Nitrógeno Total (NTK)	mg/l	0,50	1	-	-
Fósforo (P)	mg/l	0,13	0,5	-	-
Coliformes fecales	NMP/100 mg/l	835,87	2,1	-	-
Grasas y Aceites	mg/l	0,42	1	-	-

AÑO 0 – Aguas Altas

Se utilizó un caudal de bombeo de 1.168 l/s constante durante 24 de las 48 horas de simulación en régimen de aguas altas.

Los resultados obtenidos para la pluma de contaminación para esta fase se presentan en la tabla 20.

No se presentaron valores en la descarga superiores a los indicados en la Ley 1614/00 y las plumas se mantienen confinadas al centro del canal.

Las plumas de contaminación por parámetro se pueden observar en las figuras 68 a la 74.



Tabla 20. Características máximas de la pluma de contaminación en el río Paraguay para E2-Año 0-Aguas Altas.

Parámetro	Unidades	Concentración en la descarga	Longitud de la Pluma (m)	Concentración máxima de descarga (Ley 1614/00)	Longitud de la Pluma para cumplir R 222/02
DBO Total	mg/l	2,51	2	250	-
DQO	mg/l	5	1	600	-
Sólidos Suspendedos Totales (SST)	mg/l	2,09	1,5	500	-
Nitrógeno Total (NTK)	mg/l	0,50	1	-	-
Fósforo (P)	mg/l	0,13	0,5	-	-
Coliformes fecales	NMP/100 mg/l	835,87	2,1	-	-
Grasas y Aceites	mg/l	0,42	1	-	-



Figura 68. Pluma de contaminación para DBO para escenario 2, AÑO 0 – AA para PTAR Lambaré.



Figura 69. Pluma de contaminación para DQO para escenario 2, AÑO 0 – AA para PTAR Lambaré.



Figura 70. Pluma de contaminación para Sólidos Suspendedos para escenario 2, AÑO 0 – AA para PTAR Lambaré.



Figura 71. Pluma de contaminación para Nitrógeno para escenario 2, AÑO 0 – AA para PTAR Lambaré.



Figura 72. Pluma de contaminación para Fósforo para escenario 2, AÑO 0 – AA para PTAR Lambaré.



Figura 73. Pluma de contaminación para Coliformes Fecales para escenario 2, AÑO 0 – AA para PTAR Lambaré.



Figura 74. Pluma de contaminación para Grasas y Aceite para escenario 2, AÑO 0 – AA para PTAR Lambaré.

ETAPA 1 – Aguas Medias

Se utilizó un caudal de bombeo de 2.337 l/s constante durante 24 de las 48 horas de simulación en régimen de aguas medias.

Los resultados obtenidos para la pluma de contaminación para esta fase se presentan en la tabla 21.

Tabla 21. Características máximas de la pluma de contaminación en el río Paraguay para E2-Etapa 1-Aguas Medias.

Parámetro	Unidades	Concentración en la descarga	Longitud de la Pluma (m)	Concentración máxima de descarga (Ley 1614/00)	Longitud de la Pluma para cumplir R 222/02
DBO Total	mg/l	4,82	1	250	-
DQO	mg/l	9,63	1,5	500	140
Sólidos Suspendidos Totales (SST)	mg/l	4,01	2	600	-
Nitrógeno Total (NTK)	mg/l	0,96	1	-	-
Fósforo (P)	mg/l	0,24	2	-	-
Coliformes fecales	NMP/100 mg/l	1375	3,5	-	-
Grasas y Aceites	mg/l	0,80	1	-	-

No se presentaron valores en la descarga superiores a los indicados en la Ley 1614/00 y las plumas se mantienen confinadas al centro del canal.

Las plumas de contaminación por parámetro se pueden observar en las figuras 75 a la 81.





Figura 75. Pluma de contaminación para DBO para escenario 2, ETAPA 1 – AM en PTAR Lambaré.



Figura 76. Pluma de contaminación para DQO para escenario 2, ETAPA 1 – AM en PTAR Lambaré.



Figura 77. Pluma de contaminación para Sólidos Suspendedos para escenario 2, ETAPA 1 – AM en PTAR Lambaré.



Figura 78. Pluma de contaminación para Nitrógeno para escenario 2, ETAPA 1 – AM en PTAR Lambaré.



Figura 79. Pluma de contaminación para Fósforo para escenario 2, ETAPA 1 – AM en PTAR Lambaré.



Figura 80. Pluma de contaminación para Coliformes Fecales para escenario 2, ETAPA 1 – AM en PTAR Lambaré.



Figura 81. Pluma de contaminación para Grasas y Aceite para escenario 2, ETAPA 1 – AM en PTAR Lambaré.

ETAPA 1 – Aguas Altas

Se utilizó un caudal de bombeo de 2.337 l/s constante durante 24 de las 48 horas de simulación en régimen de aguas altas.

Los resultados obtenidos para la pluma de contaminación para esta fase se presentan en la tabla 22.

No se presentaron valores en la descarga superiores a los indicados en la Ley 1614/00 y las plumas se mantienen confinadas al centro del canal.

Las plumas de contaminación por parámetro se pueden observar en las figuras 82 a la 88.



Tabla 22. Características máximas de la pluma de contaminación en el río Paraguay para E2-Etapa1-Aguas Altas.

Parámetro	Unidades	Concentración en la descarga	Longitud de la Pluma (m)	Concentración máxima de descarga (Ley 1614/00)	Longitud de la Pluma para cumplir R 222/02
DBO Total	mg/l	3,16	1,5	250	-
DQO	mg/l	6,32	2,3	500	12
Sólidos Suspendedos Totales (SST)	mg/l	2,63	3	600	-
Nitrógeno Total (NTK)	mg/l	0,63	2,5	-	-
Fósforo (P)	mg/l	0,16	1,5	-	-
Coliformes fecales	NMP/100 mg/l	1052	2,3	-	5
Grasas y Aceites	mg/l	0,53	1	-	-



Figura 82. Pluma de contaminación para DBO para escenario 2, ETAPA 1 – AA para PTAR Lambaré.



Figura 83. Pluma de contaminación para DQO para escenario 2, ETAPA 1 – AA para PTAR Lambaré.



Figura 84. Pluma de contaminación para Sólidos Suspendedos para escenario 2, ETAPA 1 – AA para PTAR Lambaré.



Figura 85. Pluma de contaminación para Nitrógeno para escenario 2, ETAPA 1 – AA para PTAR Lambaré.



Figura 86. Pluma de contaminación para Fósforo para escenario 2, ETAPA 1 – AA para PTAR Lambaré.



Figura 87. Pluma de contaminación para Coliformes Fecales para escenario 2, ETAPA 1 – AA para PTAR Lambaré.



Figura 88. Pluma de contaminación para Grasas y Aceite para escenario 2, ETAPA 1 – AA para PTAR Lambaré.

Escenario 3: Simulación de condición extrema (Año 0 y Etapa 1 en nivel mínimo histórico del Paraguay, sin tratamiento ni desinfección)

AÑO 0.

Se utilizó un caudal de bombeo de 1.168 L/s constante durante 24 de las 48 horas de simulación en régimen de aguas mínimas históricas.

Tal y como era de esperarse, una vez observados los resultados para aguas bajas, en este escenario extremo se puede observar que en el caso de coliformes fecales, se presentaron valores muy superiores a la Ley 1614/00 e incluso una pluma de contaminación que podría comprometer la margen izquierda del Paraguay aguas debajo de la PTAR.

Para el resto de los parámetros no se presentaron valores en la descarga superiores a los indicados en la Ley 1614/00, las plumas se mantienen confinadas al canal y si bien en el punto de descarga la DBO y DQO presentan valores elevados, estos alcanzan los valores admisibles en distancias muy cortas por lo que se consideran en norma.

Los resultados obtenidos para la pluma de contaminación para esta fase se presentan en la tabla 23.

Tabla 23. Características máximas de la pluma de contaminación en el río Paraguay para E3-Año 0.

Parámetro	Unidades	Concentración en la descarga	Longitud de la Pluma (m)	Concentración máxima de descarga (Ley 1614/00)	Longitud de la Pluma para cumplir R 222/02
DBO Total	mg/l	5,71	1	250	7
DQO	mg/l	11,41	1,3	500	135
Sólidos Suspendidos Totales (SST)	mg/l	4,75	1,5	-	-
Nitrógeno Total (NTK)	mg/l	1,14	1	-	-
Fósforo (P)	mg/l	0,29	0,5	-	-
Coliformes fecales	NMP/100 mg/l	133.421,00	51	-	Cerca de las Margenes
Grasas y Aceites	mg/l	0,95	1	-	-

Las plumas de contaminación por parámetro se pueden observar en las figuras 89 a la 95.



Figura 89. Pluma de contaminación para DBO para escenario 3, AÑO 0 para PTAR Lambaré.



Figura 90. Pluma de contaminación para DQO para escenario 3, AÑO 0 para PTAR Lambaré.



Figura 91. Pluma de contaminación para Sólidos Suspendedos para escenario 3, AÑO 0 para PTAR Lambaré.



Figura 92. Pluma de contaminación para Nitrógeno para escenario 3, AÑO 0 para PTAR Lambaré.



Figura 93. Pluma de contaminación para Fósforo para escenario 3, AÑO 0 para PTAR Lambaré.



Figura 94. Pluma de contaminación para Coliformes Fecales para escenario 3, AÑO 0 para PTAR Lambaré.



Figura 95. Pluma de contaminación para Grasas y Aceite para escenario 3, AÑO 0 para PTAR Lambaré.

ETAPA 1.

Se ha utilizado un caudal de bombeo de 1.168 l/s constante durante 24 de las 48 horas de simulación en régimen de aguas mínimas históricas.

Los resultados obtenidos para la pluma de contaminación para esta fase se presentan en la tabla 24.

Al igual que en el caso anterior las concentraciones de coliformes fecales son elevadas, no obstante, el problema se intensifica debido al aumento del caudal de vertido. El resto de los parámetros se pueden considerar dentro de la norma, aunque existe un efecto limitado al analizar DBO y DQO que sin embargo se mantiene concentrado al centro del cauce y por una distancia inferior a los 800 m

Las plumas de contaminación por parámetro se pueden observar en las figuras 96 a la 102.

Tabla 24. Características máximas de la pluma de contaminación en el río Paraguay para E3-Etapa 1.

Parámetro	Unidades	Concentración en la descarga	Longitud de la Pluma (m)	Concentración máxima de descarga (Ley 1614/00)	Longitud de la Pluma para cumplir R 222/02
DBO Total	mg/l	10,96	2	250	156
DQO	mg/l	21,92	1,5	500	700
Sólidos Suspendidos Totales (SST)	mg/l	9,13	1,3	600	-
Nitrógeno Total (NTK)	mg/l	2,19	1	-	-
Fósforo (P)	mg/l	0,55	1,5	-	-
Coliformes fecales	NMP/100 mg/l	260.000,00	55	-	Cerca de las márgenes
Grasas y Aceites	mg/l	1,83	1	-	-



Figura 96. Pluma de contaminación para DBO para escenario 3, ETAPA 1 para la PTAR Lambaré.



Figura 97. Pluma de contaminación para DQO para escenario 3, ETAPA 1 para la PTAR Lambaré.



Figura 98. Pluma de contaminación para Sólidos Suspendingos para escenario 3, ETAPA 1 para la PTAR Lambaré.



Figura 99. Pluma de contaminación para Nitrógeno para escenario 3, ETAPA 1 para la PTAR Lambaré



Figura 100. Pluma de contaminación para Fósforo para escenario 3, ETAPA 1 para la PTAR Lambaré.



Figura 101. Pluma de contaminación para Coliformes Fecales para escenario 3, ETAPA 1 para la PTAR Lambaré.



Figura 102. Pluma de contaminación para Grasas y Aceite para escenario 3, ETAPA 1 para la PTAR Lambaré.

Escenario 4: Simulación de diseño 1-Tratamiento Primario (Etapa 1 en aguas bajas con reducción de DBO en 30%, con desinfección, CF = 1.5E+6 NMP/100 mg/l y con tratamiento completo CF=1.5E+5 NMP/100 mg/l

Se ha utilizado un caudal de bombeo de 2.337 l/s constante durante 24 de las 48 horas de simulación en régimen de aguas medias.

Los resultados obtenidos para la pluma de contaminación para esta fase se presentan en la tabla 25.

Tabla 25. Características máximas de la pluma de contaminación en el río Paraguay para E4-Etapa 1.

Parámetro	Unidades	Concentración en la descarga	Longitud de la Pluma (m)	Concentración máxima de descarga (Ley 1614/00)	Longitud de la Pluma para cumplir R 222/02
DBO Total	mg/l	4,97	1	50	-
CF (desinfección)	NMP/100/mg/l	236.663	117	4000	4000
CF (tratamiento)	NMP/100/mg/l	2.366	2	4000	255

En el caso de DBO no se presentaron valores en la descarga superiores a los indicados en la Ley 1614/00, la pluma se mantiene confinada al centro del canal y también se cumple desde la descarga la Resolución 222/02. En cuanto a Coliformes fecales para la condición de desinfección se observaron valores elevados en la descarga, pero estos valores tienen un efecto limitado y la pluma se contienen en el centro del canal. No se observaron valores por sobre la norma cerca de las márgenes. Para la etapa de tratamiento los valores de Coliformes Fecales se mantienen en valores admisibles tanto para la Ley 1614/00 como para la Resolución 222/02.

La pluma de contaminación para DBO con reducción del 30%, la pluma para coliformes fecales para la etapa de desinfección (1.5E+6) y la pluma para coliformes fecales para la etapa de tratamiento primario (1.5E+5) se observan en las figuras 103, 104 y 105.





Figura 103. Pluma de contaminación para DBO para el escenario 4, ETAPA 1 para la PTAR Lambaré.



Figura 104. Pluma de contaminación para CF para el escenario 4, ETAPA 1 (desinfección) para la PTAR Lambaré



Figura 105. Pluma de contaminación para CF para el escenario 4, ETAPA 1 (tratamiento) para la PTAR Lambaré.

Escenario 5: simulación de diseño 2-Tratamiento Primario y Secundario (Etapa 2 en aguas bajas con reducción de DBO en 80%).

Se ha utilizado un caudal de bombeo de 2,542 l/s constante durante 24 de las 48 horas de simulación en régimen de aguas altas.

Los resultados obtenidos para la pluma de contaminación para esta fase se presentan en la tabla 26.

Tabla 26. Características máximas de la pluma de contaminación en el río Paraguay para E5-Etapa 2.

Parámetro	Unidades	Concentración en la descarga	Longitud de la Pluma (m)	Concentración máxima de descarga (Ley 1614/00)	Longitud de la Pluma para cumplir R 222/02
DBO Total	mg/l	1,61	1	50	-

No se presentan valores en la descarga superiores a los indicados en la Ley 1614/00 y la pluma se mantiene confinada al centro del canal.

La pluma de contaminación de DBO con reducción del 80% se pueden observar en la figura 106.



Figura 106. Pluma de contaminación para DBO para el escenario 5, ETAPA 2 para la PTAR Lambaré.

Escenario 6: Simulación de Bypass (Etapa 2 en aguas bajas y medias para simular una falla en la planta)

ETAPA 2 – Aguas Bajas

Se ha utilizado un caudal de bombeo de 2,542 l/s constante durante 24 de las 48 horas de simulación en régimen de aguas bajas.

Los resultados obtenidos para la pluma de contaminación para esta fase se presentan en la tabla 27.

En este escenario se simuló únicamente las concentraciones de DBO y Coliformes Fecales. No se presentan valores en la descarga superiores a los indicados en la Ley 1614/00 y las plumas se mantienen confinadas al centro del canal.

Tabla 27. Características máximas de la pluma de contaminación en el río Paraguay para E6-Etapa2-Aguas Bajas.

Parámetro	Unidades	Concentración en la descarga	Longitud de la Pluma (m)	Concentración máxima de descarga (Ley 1614/00)	Longitud de la Pluma para cumplir R 222/02
DBO Total	mg/l	8,07	1	50	54
Coliformes fecales	NMP/100 mg/l	2690	2	4000	516

Las plumas de contaminación por parámetro se pueden observar en las figuras 107 y 108.



Figura 107. Pluma de contaminación para DBO para el escenario 6, ETAPA 2 (AB) para la PTAR Lambaré.



Figura 108. Pluma de contaminación para Coliformes Fecales para el escenario 6, ETAPA 2 (AB) para la PTAR Lambaré.

ETAPA 2 – Aguas Medias

Se ha utilizado un caudal de bombeo de 2.542 l/s constante durante 24 de las 48 horas de simulación en régimen de aguas medias.

Para este escenario se simuló únicamente las concentraciones de DBO y Coliformes Fecales.

Los resultados obtenidos para la pluma de contaminación para esta fase se presentan en la tabla 28.

Tabla 28. Características máximas de la pluma de contaminación en el río Paraguay para E6-Etapa2-Aguas Medias.

Parámetro	Unidades	Concentración en la descarga	Longitud de la Pluma (m)	Concentración máxima de descarga (Ley 1614/00)	Longitud de la Pluma para cumplir R 222/02
DBO Total	mg/l	5,47	1	50	22
Coliformes fecales	NMP/100 mg/l	1824,95	1,5	4000	170

No se presentan valores en la descarga superiores a los indicados en la Ley 1614/00 y las plumas se mantienen confinadas al centro del canal.

Las plumas de contaminación por parámetro se pueden observar en las figuras 109 y 110.



Figura 109. Pluma de contaminación para DBO para el escenario 2, ETAPA 2 (AM) para la PTAR Lambaré.



Figura 110. Pluma de contaminación para Coliformes Fecales para el escenario 2, ETAPA 2 (AM) para la PTAR Lambaré

2.4. Análisis de los resultados

Una vez finalizadas las simulaciones se puede llegar a las siguientes conclusiones:

- Para las simulaciones en condiciones de operación iniciales (descarga sin tratamiento, ni desinfección) y para las condiciones de desinfección, se observa, tal y como es de esperar, debido a los caudales de descarga y a las características hidráulicas del río Paraguay, valores elevados de concentración en la descarga para coliformes fecales. Si bien el esquema de localización y distribución de los difusores mejorará considerablemente las condiciones que provendrían de un vertido directo no controlado, limitando las concentraciones mayores al centro del cauce, reduciendo su efecto en las márgenes, es importante resaltar que los resultados implican que para el caso particular de la PTAR de Lambaré no solo es necesaria la construcción de esta, sino que es también necesario avanzar hasta el tratamiento secundario (Etapa 2), para garantizar que se mejoren las condiciones de calidad de agua del río Paraguay.
- Para el resto de los parámetros simulados se observa también el efecto de dispersión de la descarga controlada que logra garantizar que las concentraciones cerca de las márgenes se encuentren siempre por debajo de los valores admitidos por la normativa vigente paraguaya para la calidad de las aguas (Resolución 222/02).
- En función a los datos disponibles, para las condiciones de diseño presentadas y al comparar con la normativa vigente paraguaya para la descarga, la PTAR no representa un riesgo ambiental para el cauce del río Paraguay. En este sentido en la tabla 29 se puede observar que todos los parámetros se encuentran por debajo de los límites establecidos, incluyendo la Etapa 2 que únicamente se toma en cuenta como escenario de falla de la planta de tratamiento.
- En función a los datos disponibles, para el diseño presentado y al comparar con la normativa vigente paraguaya para la calidad de las aguas (Resolución 222/02), si se asume como agua de clase 2, se observa que si bien algunos parámetros en la zona de vertido tienen valores superiores dichos valores se normalizan en una distancia relativamente corta, manteniéndose concentrados en una zona restringida al centro del canal.
- Adicionalmente en la zona de vertido no existen zonas recreativas ni ninguna otra de las actividades (usos preponderantes) que definen a las aguas de clase 2. Las comparaciones pueden observarse en la Tabla 30. La tabla incluye la Etapa 2 que representa el escenario posible en caso de falla de la planta de tratamiento.
- También se resalta el hecho de que cuando se presenten condiciones extraordinarias de sequía, como la ocurrida en octubre del 2020, incluso para la planta de tratamiento completamente operativa, será necesario implementar un mecanismo de contingencia que permita dar continuidad a la operación con niveles de caudales menores de modo a

no causar un impacto negativo en la calidad del agua del río Paraguay durante la duración del fenómeno.

Tabla 29. Verificación de vertido con los límites de calidad para descargas de efluentes en el río Paraguay para el escenario de diseño (Aguas Bajas).

Parámetro	Unidades	Descarga a Colectoras	Descarga con tratamiento primario	Descarga con tratamiento secundario	Año 0	Etapa 1	Etapa 2
DBO Total	mg/l	250	<120	<50	3,70	7,00	8,07
DQO	mg/l	600	<310	<50	7,39	14,20	-
Sólidos Suspendidos Totales (SST)	mg/l	500	<100	<80	3,09	5,92	-
Nitrógeno Total (NTK)	mg/l	-	-	-	0,74	1,42	-
Coliformes Fecales (tratamiento completo)	NMP/100 mg/l		<4000	<4000	1231	2366	2690
Fósforo	mg/l	-	-	-	0,18	0,35	-
Grasas y Aceites	mg/l	100	<50	<50	0,62	1,18	-

Tabla 30. Distancia en metros para normalización de parámetros cuyos valores se encuentran fuera de la norma en el área de vertido asumiendo valores para agua clase 2 en el río Paraguay.

Parámetro	Valor Esperado	Año 0	Etapa 1	Etapa 2
DBO Total	Hasta 5	-	32 m	54 m
DQO	Hasta 5	32 m	270 m	-
Coliformes Fecales	Hasta 1000	5 m	255 m	1400 m

- Para el año 0, el valor de concentración para CF cae dentro de los valores admisibles para aguas de Clase 2 a aproximadamente a 5 m del vertido, mientras que para la Etapa 1 la concentración para CF cae dentro de los valores admisibles para aguas de Clase 2 a aproximadamente 250 m del punto de vertido. La Etapa 2, es la única que presenta valores elevados de concentración de Coliformes Fecales que se mantienen en el espacio extendiéndose por 500 m. Sin embargo, se recuerda que esta no es una fase operativa sino la simulación del caso extremo en el que se presenta una falla total del sistema de tratamiento con vertimiento directo al cauce.
- En ningún momento, para ninguno de los casos se estiman concentraciones elevadas de Coliformes Fecales cerca de las márgenes, esto se evidencia incluso para los escenarios en los que no están incluidos procesos de desinfección, o tratamientos primarios/secundarios (CF 1E+7 NPM100/mg/l y 1E+6 NPM100/mg/l).

- En las etapas de diseño de tratamiento ($CF = 1E+5$ NPM100/mg/l), se obtiene que el valor de coliformes fecales está dentro de los márgenes admisibles si se considera la zona de vertido como agua de Clase 3.
- Se espera que adicionalmente la instalación de difusores reduzca ulteriormente las concentraciones de los parámetros en la zona de vertido, este efecto no puede ser simulado por el HydroBID Flood ya que solo se simula dispersión longitudinal y lateral con concentración promediada en la vertical.



CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

El modelo HydroBID Flood se presenta como una herramienta de utilidad para la gestión informada y apropiada de los recursos hídricos y la toma de decisiones en el proceso de planificación del saneamiento urbano, apoyando al diseño de plantas de tratamiento, en tanto permite identificar la ubicación óptima de la descarga del emisario y el número mínimo de difusores a incorporar, así como evaluar las condiciones ambientales del cuerpo de agua receptor durante todas las fases de desarrollo de la PTAR e incluso identificar las condiciones de operación durante eventos extremos, facilitando evaluar medidas operativas de mitigación a ser incorporadas. La implementación de HydroBID Flood en proyectos de infraestructura aporta beneficios tanto en el diseño de la operación, como en los análisis necesarios para estimación de niveles de vulnerabilidad y para la verificación de las condiciones ambientales del proyecto, permitiendo incluso la incorporación de las variables de cambio climático para estimar el cambio en regímenes hidrológicos e hidráulicos.

Al realizar el análisis de la PTAR de Ciudad del Este, en función a los datos disponibles, para el diseño presentado, y al comparar con la normativa vigente paraguaya para la descarga, ésta no representa un riesgo ambiental para el cauce del río Paraná en Ciudad del Este, en ninguna de sus etapas de desarrollo e independientemente del nivel de operación de la PTAR. Al verificar la normativa vigente paraguaya para la calidad de las aguas (Resolución 222/02), asumiendo como agua de clase 2, se observa que el único parámetro que sobrepasa los límites es el de coliformes fecales, sin embargo, esto ocurre en el punto de descarga y con una pluma confinada al centro del cauce y que se dispersa en una distancia inferior a los 150 m.

El caso de la PTAR de Lambaré es de mayor complejidad debido a las características del río Paraguay en la zona de proyecto. Para las condiciones de diseño presentadas y al comparar con la normativa vigente paraguaya para la descarga, la PTAR, una vez totalmente operativa, no representa un riesgo ambiental para el cauce del río Paraguay, salvo eventos excepcionales de sequías extremas, durante los cuales la PTAR tendría que reducir el nivel de operación para evitar tener un efecto negativo en la calidad de las aguas. En este sentido se observa que todos los parámetros se encuentran por debajo de los límites establecidos. Al comparar con la normativa vigente paraguaya para la calidad de las aguas (Resolución 222/02), si se asume como agua de clase 2, se observa que, si bien algunos parámetros en la zona de vertido tienen valores superiores, dichos valores se normalizan en una distancia relativamente corta y manteniéndose concentrados en una zona restringida al centro del canal.

Los análisis realizados demuestran la importancia que tiene la hidrodinámica en los procesos de dispersión de contaminantes. Para los casos analizados, la simulación permite concluir que la implementación de las plantas de pretratamiento de aguas residuales previstas cumplen el objetivo de saneamiento ambiental, mediante la recuperación gradual de los cuerpos de agua en las áreas de influencia de los proyectos y posibilita el aumento en la destinación de recursos de inversión a la ampliación de sistemas de alcantarillado sanitario, permitiendo la mejora y el avance progresivo en la gestión adecuadas de las aguas residuales.

Sin perjuicio de lo anterior, de modo a precisar los resultados de los modelos se recomienda:

- Realizar mediciones de campo para obtener los coeficientes de dispersión longitudinales y transversales del río Paraguay en el punto de vertido, dado que daría mayor exactitud al estudio.
- Obtener la concentración real de Coliformes Fecales que será vertida desde las PTAR.
- Realizar mediciones de campo de las condiciones de calidad de agua en los ríos Paraná y Paraguay de modo de establecer una línea base que permitiría no solo monitorear la operación de los emisores sino evaluar la calidad de agua general de ambos ríos, permitiendo identificar otras potenciales acciones para garantizar la sostenibilidad ambiental de estos.

RECOMENDACIONES PARA FUTUROS ANÁLISIS

La disponibilidad de información relacionada a los recursos hídricos es uno de los requerimientos fundamentales para poder lograr una aproximación correcta mediante las herramientas de modelación, siendo necesario que los organismos encargados de velar por la protección y conservación de los recursos hídricos avancen en procesos de generación y sistematización de este tipo de datos.

Dado el contexto de Paraguay, de baja disponibilidad de información sobre los recursos hídricos, la herramienta HydroBID permite lograr este objetivo, debido a que calcula la disponibilidad hídrica basada en un método de simulación hidrológica versátil y accesible a entornos con limitado monitoreo climatológico y/o hidrológico. Adicionalmente, la Herramienta HydroBID Flood podría apoyar la estimación de caudales en cursos de agua poco monitoreados a partir de información hidrológica y de caracterización, así como utilizarse adicionalmente como instrumento de monitoreo de calidad y transporte de sedimentos.

Por lo anterior, se recomienda al país avanzar en un proceso gradual de mejora en la calidad y eficiencia de sus servicios hidroclimáticos y en un inventario nacional de disponibilidad hídrica que le permita tener un conocimiento consistente a escala temporal y espacial sobre la disponibilidad de agua. Es también de suma importancia establecer programas de medición de datos de calidad de agua de manera sistemática y continua en los principales cuerpos de agua y principalmente en áreas urbanas y productivas.

Un mayor conocimiento de los recursos hídricos en términos de cantidad y calidad permitirá ampliar el uso de este tipo de herramientas para la planificación y el monitoreo del recurso hídrico nivel local, nacional y regional y la implementación más eficiente las acciones.

ANEXOS



ANEXO A. Normativa ambiental del Paraguay y las políticas ambientales del BID: Aspectos normativos para la gestión de los recursos hídricos del Paraguay

En Paraguay, el agua se gestiona conforme distintos niveles de regulación normativa. A nivel constitucional, los artículos 7 y 8 de la Carta Política garantizan el derecho a un ambiente adecuado y a la protección ambiental bajo una perspectiva general, determinando que todas las aguas son del dominio del Estado. En el nivel internacional, Paraguay ha ratificado varios acuerdos¹⁴ que constituyen instrumentos con incidencia en la gestión y protección del agua en términos de consumo humano, navegación, transporte y desarrollo, biodiversidad, humedales y cambio climático, aprovechamiento hidroeléctrico, entre otros. En el nivel administrativo¹⁵, se han desarrollado distintas normas que regulan la gestión de los recursos hídricos y sus distintos usos como el agua potable y saneamiento, la disposición de efluentes; los sectores productivos agrícola, industrial, forestal, de pesca y acuicultura; la evaluación de impactos ambientales, áreas silvestres protegidas y el pago por servicios ambientales.

La Ley 3239/07 de los recursos hídricos del Paraguay regula la gestión sustentable de todas las aguas y los territorios que las producen con el fin de hacerla social, económica y ambientalmente sostenible. Esta garantiza el acceso al agua como derecho y establece la gestión por cuencas de manera participativa, con el otorgamiento de permisos y concesiones para los distintos usos por prioridades. Esta ley, bajo aplicación del Ministerio del Ambiente y Desarrollo Sostenible (MADES), prevé el desarrollo de una política nacional de recursos hídricos, un inventario nacional y un registro nacional de aguas, aún en proceso de consolidación. Entre los aspectos regulados por la ley de aguas están los permisos de usos de aprovechamiento aguas superficiales y subterráneas, con la asignación de caudales ambientales, zonas de recargas y niveles de calidad de protección de las aguas, prohibiendo todo tipo de uso o vertidos de efluentes sin el correspondiente título de permiso o

Como instrumentos normativos principales para la prevención de la contaminación de las aguas y el control de los vertidos a recursos hídricos en todo el territorio nacional, el MADES cuenta con las Resoluciones 222/2002 “*Calidad de las aguas en el territorio nacional*” y N° 255/2003 “*Clasificación de las aguas superficiales*” que establecen la clasificación y norma de calidad de aguas para la gestión de los recursos hídricos del país.

14. Argentina (Ley N° 270/71). ▫ El Tratado para la construcción y administración de la Represa de Itaipú (Ley N° 89/73) ▫ El Tratado para la construcción y administración de la Represa de Yacyretá, (Ley N° 433/73) ▫ El Convenio de Basilea sobre el Control de los Movimientos Transfronterizos de los Desechos Peligrosos y su Eliminación (Ley N° 42/90) ▫ El Convenio sobre Biodiversidad (Ley N° 253/93) ▫ El Acuerdo de Transporte Fluvial por la Hidrovía Paraguay – Paraná (Ley N° 269/93) ▫ La Convención Relativa a los Humedales de Importancia Internacional (Ley N° 350/94) ▫ El Convenio sobre Conservación y Desarrollo de los Recursos Ícticos en los Tramos Limítrofes de los Ríos Paraná y Paraguay con la Argentina (Ley N° 1.074/97) ▫ El Acuerdo Constitutivo de la Comisión Trinacional para el Desarrollo de la Cuenca del Pilcomayo (Ley N° 580/95) ▫ El Acuerdo para la Conservación de la Fauna Acuática en los Cursos de los Ríos Limítrofes entre el Paraguay y Brasil y su Protocolo Adicional (Ley N° 1572/00).

15. Ley N° 3239/07 “*De los Recursos Hídricos del Paraguay*”, Ley N° 1.614/00 “*Marco Regulatorio y Tarifario del Servicio Público de Provisión de Agua Potable y Alcantarillado Sanitario*”, La Resolución N° 222/02 “*Calidad de las aguas en el territorio nacional*”, La Resolución N° 255/03 “*Clasificación de las aguas superficiales*”, Ley N° 294/93 de *Evaluación de impacto ambiental*, Ley N° 422/73 “*Forestal*”, Ley N° 4241/10 “*De Restablecimiento de bosques*”, Ley N° 3556/08 “*De Pesca y Acuicultura*”, Ley N° 352/94 *Áreas Silvestres Protegidas*, Ley N° 3001/06 *Pago por servicios ambientales*.

La resolución 222 fue elaborada en base a 4 normas internacionales, correspondientes a la Organización Mundial de la Salud (OMS), la Agencia de Protección Ambiental de Estados Unidos (EPA por sus siglas en inglés), Brasil y Japón, y considerando también las características de efluentes de las principales categorías industriales en actividades en Paraguay y todos los tipos de agro tóxicos registrados en el Ministerio de Agricultura y Ganadería (MAG) en el período de 1992 a 2002, así como también, las sustancias tóxicas provenientes de humos de automóviles, policlorobifenilos (PCB), microcistinas de cianobacterias, dioxina, etc. que originan varias actividades antropogénicas adversas¹⁶. Esta resolución establece los límites permisibles para 4 clases de calidad aguas superficiales, de acuerdo con el uso preponderante de los recursos hídricos. El agua que pertenece a la clase 1 se destina para el abastecimiento público, sin ningún tratamiento o mediante el tratamiento sencillo tales como, la cloración o filtración; el agua de clase 2 puede ser destinada para abastecimiento público, a través de tratamientos convencionales; la de clase 3, a través de un tratamiento avanzado y la de clase 4 puede ser utilizada, solamente, para la preservación de aspecto paisajístico.

Estas normas también establecen el patrón de emisión de efluentes de fuentes poluentes como primer control, en el que debe prevalecer la calidad del agua establecida en cada cuerpo receptor para la evaluación final de control y emisión de efluentes líquidos. Considerando las normativas y en base al estado avanzado de deterioro de la calidad de los recursos hídricos del país, en la regiones de mayor concentración urbana y en los ríos que atraviesan la frontera, tales como el río Paraná y río Paraguay y sus afluentes, y ante la ausencia del conocimiento acabado de las condiciones sanitarias de cada río y curso de agua, el MADES estableció la Resolución 255/2006 con el encuadramiento precautelador de la clase 2 para todo los recursos hídricos del territorio Paraguayo. Bajo esta prerrogativa, el agua de clase 1 debe presentar la calidad de agua para poder ser utilizada directamente para el abastecimiento o a través de un tratamiento simplificado, por lo que prohíbe el lanzamiento de ningún tipo de efluentes poluentes, inclusive de cloacas sanitarias, en una cuenca hidrográfica escogida para esta clase. Sin embargo, el agua de clase 2 puede ser utilizada para el abastecimiento, a través de un tratamiento convencional, permitiendo la mayor tolerancia de la presencia de fuentes poluentes que se deben adecuar para atender las normas de efluentes y calidad de cuerpos receptores establecidos en la resolución 222/2002.

Políticas ambientales y sociales del Banco Interamericano de Desarrollo

El Grupo BID cuenta con un conjunto de políticas, también conocidas como salvaguardias, que buscan garantizarla protección contra daños ambientales y sociales, aumentar el valor de desarrollo de los actores y facilitar que países y clientes incorporen mejores prácticas internacionales. Estas salvaguardias incluyen requisitos operativos a nivel de proyectos.

16. JICA, MADES., 2006. Informe final del estudio de la calidad del agua del río Paraguay.

Los proyectos mencionados previamente se enmarcan en la guía operacional **OP 703 - Medio Ambiente y Cumplimiento de Salvaguardias** en cuanto a mejorar la calidad ambiental (1.2-iii) y el desarrollo urbano (1.2.v), así como fomentar el desarrollo sostenible, en particular de los recursos hídricos (1.2.vii). En este sentido, a modo de asegurar la sostenibilidad ambiental del recurso hídrico, posteriormente a las intervenciones a ser realizadas, esta política solicita la realización de un estudio del modelado matemático de la pluma de efluentes de las PTAR sobre el río Paraná y Paraguay. En el caso del Proyecto RG-L1134 (río Paraná) adicionalmente se realiza de manera a confirmar que no habrá impactos transfronterizos por las descargas de dichos efluentes.





BID

Banco Interamericano
de Desarrollo

