



UNIVERSIDAD
DE LA REPUBLICA
URUGUAY

Resuspensión de sedimentos por una obra de dragado en el Río de la Plata.

Caso: Central de Ciclo Combinado (UTE), Punta del Tigre, San José.

Ing. Gonzalo Claramunt Tammaro

Programa de Maestría en Ingeniería Ambiental.

Facultad de Ingeniería

Universidad de la República

Montevideo – Uruguay

Octubre 2022



UNIVERSIDAD
DE LA REPUBLICA
URUGUAY

Resuspensión de sedimentos por una obra de dragado en el Río de la Plata.

Caso: Central de Ciclo Combinado (UTE), Punta del Tigre, San José.

Ing. Gonzalo Claramunt Tammaro

Tesis de presentada al Programa de Maestría en Ingeniería Ambiental, Facultad de Ingeniería de la Universidad de la Republica, como parte de los requisitos para la obtención del título Magister en Ingeniería Ambiental.

Director de Tesis:

Dr. Ing. Prof. Francisco Pedocchi

Índice de Contenido

1	Introducción.....	1
2	Obras y monitoreos realizados.....	2
2.1	Dragado.....	2
2.2	Gestión del material dragado.....	3
2.3	Monitoreo de calidad de agua del Río de la Plata.....	4
2.3.1	Monitoreo de control ambiental del dragado.....	4
2.3.2	Monitoreo en marco del Convenio UTE-IMFIA.....	5
2.4	Información disponible al inicio de las obras.....	6
2.4.1	Línea de base de calidad de agua.....	6
2.4.2	Previsión del aumento de la turbiedad durante la construcción.....	7
2.4.3	Estudios geotécnicos y caracterización del subsuelo marino.....	7
3	Ambiente receptor.....	10
3.1	Ubicación.....	10
3.2	Marco hidro-geográfico general.....	12
3.3	Geomorfología.....	13
3.4	Sedimentos superficiales.....	15
3.5	Entradas de agua al Sistema.....	15
3.6	Régimen de marea y corrientes.....	16
3.7	Marco atmosférico y climático.....	16
3.8	Cuña salina – estratificación.....	17
3.9	Turbiedad.....	19
3.10	Temperatura.....	21
3.11	Oleaje.....	21
3.12	Biota.....	22
3.12.1	Fitoplancton.....	23
3.12.2	Zooplancton.....	23
3.12.3	Zoobentos.....	23
3.12.4	Peces.....	24
4	Impactos ambientales.....	28
4.1	Impactos sobre la calidad del agua.....	28
4.1.1	Cambios físicos.....	28
4.1.2	Cambios químicos.....	28

4.1.3	Suspensión y distribución de sedimentos contaminados.	29
4.2	Impactos sobre fauna y flora.....	29
4.2.1	Efectos del aumento de sólidos en suspensión.	30
4.2.2	Efectos de la extracción y depósito de sedimentos.	31
4.3	Cambios físicos del fondo marino.	32
5	Dragado y resuspensión de sedimentos.	33
5.1	Equipos y métodos de dragado, transporte y disposición de sedimentos.	33
5.1.1	Tipos de dragas.....	33
5.1.2	Transporte del material dragado.	39
5.1.3	Disposición del material dragado.....	39
5.2	Resuspensión de sedimentos.....	41
5.2.1	Factores de Resuspensión.....	43
5.2.2	Modelos de predicción.....	45
6	Normativa y Control.....	49
6.1	Normativa.....	49
6.1.1	Normativa nacional.	49
6.1.2	Referencias internacionales.	50
6.2	Medidas de control.	52
6.3	Monitoreo.	53
6.3.1	Generalidades.	53
6.3.2	Parámetros y métodos.....	54
7	Resultados y análisis de los monitoreos.....	62
7.1	Resultados de los monitoreos.....	62
7.1.1	Monitoreo de obra.	62
7.1.2	Monitoreo UdelaR.....	64
7.2	Análisis de los resultados.	74
7.2.1	Métodos estadísticos utilizados.	74
7.2.2	Comparación del monitoreo de turbiedad de obra entre los 4 puntos.....	76
7.2.3	Análisis de cumplimiento del criterio de control ambiental.	77
7.2.4	Correlación entre las mediciones de turbiedad y de profundidad de Disco Secchi.	78
7.2.5	Comparación de la turbiedad entre el monitoreo de obra y el realizado por UdelaR.	79
7.2.6	Relación entre la turbiedad y otras variables.....	81
7.2.7	Comparación de los periodos con y sin obra de dragado.	90

7.2.8	Influencia de la corriente en el monitoreo de obra	96
7.3	Discusión de resultados obtenidos.	98
8	Conclusiones.....	101
9	Referencias.....	104
10	Apéndice 1 – Reportes del Software XLSTAT	109
10.1	Análisis de componentes principales	109
10.1.1	Periodo sin obra	109
10.1.2	Periodo con obra	113
10.1.3	Periodo baja salinidad	117
10.1.4	Periodo alta salinidad.....	121
10.1.5	Variables originales	125
10.1.6	Variables modificadas por VF.....	130
10.2	Correlación entre los 4 puntos de monitoreo.....	134
10.2.1	Correlaciones de Pearson.....	134
10.2.2	Prueba de Kruskal-Wallis.....	135
10.3	Comparación de periodos con y sin obra.....	136
10.3.1	Prueba t de -Student	136
10.3.2	Prueba de Mann-Whitney.....	138

1 Introducción.

Los impactos ambientales de las obras de dragado, principalmente los asociados a la resuspensión de sedimentos, pueden representar grandes riesgos para los ecosistemas marinos y costeros, debido a lo cual los proyectos deben incorporar necesariamente la componente ambiental desde su concepción.

El presente trabajo fue motivado por el monitoreo ambiental implementado para una obra de dragado de pequeño porte, ejecutada para la instalación del sistema de enfriamiento de una central térmica, en la costa del departamento de San José, Uruguay. La evaluación se enfoca en la resuspensión de sedimentos provocada por la obra, analizando resultados de los monitoreos realizados en sitio, considerando el contexto de las variantes condiciones del Río de la Plata en la zona.

La primera parte del documento, los capítulos 2, 3 y 4 contienen respectivamente: una descripción de las obras ejecutadas y los monitoreos realizados, una descripción del medio receptor, con énfasis en las características y procesos asociados a la presencia y transporte de sedimentos, y una revisión de los principales impactos sobre los ecosistemas marinos, asociados a la resuspensión de sedimentos provocada por obras de dragado.

Para abordar la temática del dragado en general, fue necesario realizar una extensa revisión bibliográfica, en cuanto a los equipos y metodologías de dragado existentes y cómo estos influyen en la resuspensión de sedimentos, lo cual se presenta en el Capítulo 5. Dicho Capítulo contiene también una revisión de la normativa relacionada a nivel nacional y referencias internacionales, junto a una revisión de criterios y buenas prácticas de monitoreo y control.

En el Capítulo 6 se presentan los resultados de los monitoreos realizados y el procesamiento de dicha información, lo que resultó necesario para poder describir las principales características y comprender la dinámica de algunas variables del Río de la Plata en la zona, y así realizar un adecuado análisis de dichos resultados. Para ello resultó necesario realizar un análisis estadístico, para lo cual se utilizó como base la herramienta "XLSTAT" (Addinsoft, 2021 - XLSTAT statistical and data analysis solution. New York, USA - <https://www.xlstat.com>). Al final de este capítulo se presenta una discusión parcial y conclusiones sobre dicho análisis y los resultados obtenidos.

En el Capítulo 7 se presenta una discusión general sobre la adecuación del monitoreo implementado, en función de las características de la obra y el medio receptor. Finalmente, en el Capítulo 8 se presentan las conclusiones generales, resultantes de todo el trabajo realizado.

Se espera que este trabajo pueda ser utilizado como punto de partida a la hora de abordar una situación similar, en particular, para el diseño de futuros programas de monitoreo de sólidos suspendidos y el análisis de sus resultados.

2 Obras y monitoreos realizados.

2.1 Dragado.

La obra de dragado que se analizó en este trabajo formó parte de las obras de la central térmica de ciclo combinado (de 530 MW) propiedad de la Administración Nacional de Usinas y Trasmisiones Eléctricas (UTE), en Punta del Tigre, departamento de San José, Uruguay (Figura 1). La obra de la central transcurrió entre los años 2013 y 2019.

El dragado resultó necesario para la construcción del sistema de enfriamiento del ciclo de vapor de la central, el cual consiste en un circuito abierto, que toma agua directamente del Río de la Plata (RdIP), a razón de 11 m³/s y descarga al mismo cuerpo de agua.

A continuación, se resumen los principales componentes del sistema de enfriamiento:

- 8 cabezales de toma circulares de PEAD (4 x cada tubería de toma), de 5 m de diámetro.
- 2 tuberías de toma de PEAD, de 2 m de diámetro, enterradas en el lecho marino, con un desarrollo de unos 1200 m hasta la estación de bombeo.
- Una estación de bombeo en tierra, compuesta por 3 bombas, para la impulsión del agua hacia el condensador.
- Una tubería de impulsión de 2 m de diámetro, con un desarrollo de unos 250 m desde la estación de bombeo hasta el condensador.
- 2 tuberías de descarga de 2 m de diámetro, con un desarrollo en tierra de 360 m y 740 m de tramo subacuático, enterradas en el lecho.
- 8 difusores de descarga de PEAD de 0,8 m de diámetro.



Figura 1: Ubicación de la obra de la Central de Ciclo Combinado (Fuente: Google Earth)

En la Figura 2 se pueden ver las zonas afectadas por las obras marinas, donde se destaca el área de afectación del dragado, en la zona central, donde fueron enterradas las tuberías. También se puede observar la presencia de una escollera temporal, instalada para conformar un depósito transitorio para el material dragado y dar apoyo a las actividades marinas.

Para el enterramiento de las tuberías en el lecho del río, se realizó el dragado de unos 160.000 m³ de sedimentos, conformándose una trinchera de unos 1000 m de longitud, con un

Resuspensión de sedimentos por una obra de dragado en el Río de la Plata.

Caso: Central de Ciclo Combinado (UTE), Punta del Tigre, San José.

ancho máximo de 60 m y una profundidad máxima de 10 m, aproximadamente. En el extremo más alejado de la costa, donde se ubican los cabezales de toma (aprox. a 1000 m), la cota del lecho marino es -3,25 m referida al Plano de Referencia Hidrométrico (cero Wharton).

Para realizar el dragado se utilizó principalmente una draga de cuchara tipo *clamshell* y retroexcavadoras en la zona de aproximación a la costa, apoyadas por barcazas para el transporte de los sedimentos. Para minimizar el transporte de sedimentos fuera de la zona de obras, por efecto de las corrientes, se instalaron barreras para sedimentos, conformadas por una cadena de flotadores y un tejido de poliéster, anclados a bloques de hormigón fondeados. La ubicación de las mismas se puede observar en la Figura 2.

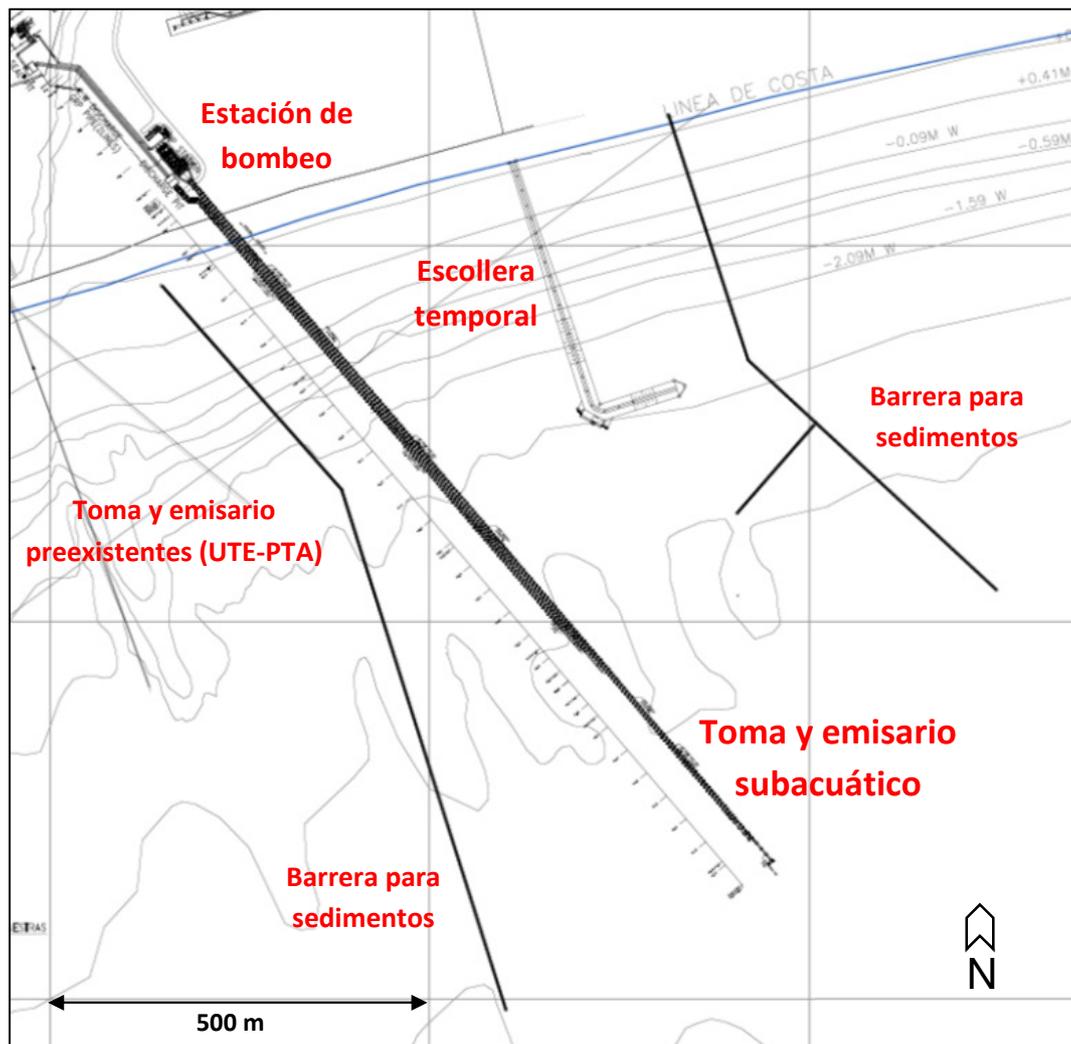


Figura 2: Planta general de las obras marinas (cotas referidas al cero Wharton).

2.2 Gestión del material dragado.

En un área próxima a la trinchera excavada para las tuberías, se instaló temporalmente una escollera de piedra, la cual resultó necesaria para contar con una protección para las actividades marinas.

La escollera tuvo un desarrollo de 400m, presentando el extremo en forma de "L", lo cual conformó un área de protección que se utilizó como acopio temporal del material dragado (ver Figura 2), debido a que parte de este sería a utilizar posteriormente para la tapada de las tuberías.

Resuspensión de sedimentos por una obra de dragado en el Río de la Plata.

Caso: Central de Ciclo Combinado (UTE), Punta del Tigre, San José.

Para el transporte y acondicionamiento del material dragado se utilizaron barcazas y excavadoras. Posteriormente, en la fase de tapada de la trinchera, también se utilizó el bombeo y transporte por tuberías.

2.3 Monitoreo de calidad de agua del Río de la Plata.

Durante todo el desarrollo de las obras marinas, se contó con dos campañas independientes de monitoreo de la calidad de agua del Río de la Plata:

- El monitoreo de control ambiental de la obra marina, ejecutado por UTE (a través del contratista) con el objetivo de controlar la resuspensión y transporte de sedimentos durante el dragado. Este monitoreo fue requerido por la autoridad ambiental (Dirección Nacional de Medio Ambiente, DINAMA), como condición de aprobación del Plan de Gestión Ambiental de Construcción (PGAC) correspondiente (RD N° 0093/15). Este monitoreo incluyó la medición de los parámetros Turbiedad y Profundidad de Disco Secchi, en cuatro puntos periféricos a las obras.
- Un programa de monitoreo realizado a través de un convenio entre UTE y la Universidad de la República, ejecutado por el Instituto de Mecánica de Fluidos e Ingeniería Ambiental de la Facultad de Ingeniería y la Facultad de Ciencias. Este monitoreo incluyó parámetros fisicoquímicos y biológicos, y cubrió tres fases del proyecto: previo a las obras marinas (línea de base), durante las obras y durante los primeros años de operación de la central. Entre otros parámetros, se monitorearon algunos de interés para este trabajo, como la turbiedad, la salinidad, las corrientes y el oleaje.

2.3.1 Monitoreo de control ambiental del dragado.

La aprobación del PGAC por parte de la DINAMA incorporó, como condición para la ejecución del dragado, el monitoreo de la Turbiedad y Profundidad de Disco Secchi. Dichos parámetros fueron monitoreados en 4 puntos periféricos a las obras, cuya ubicación puede verse en la Figura 3.

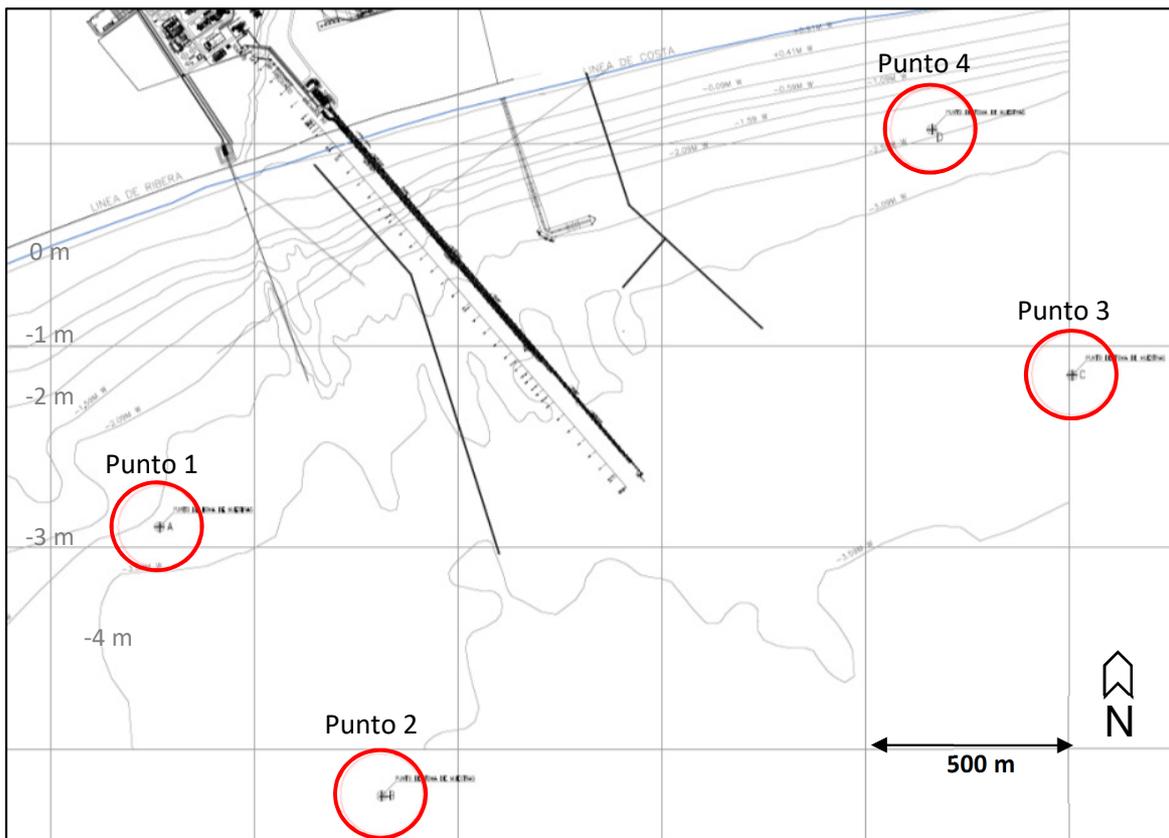


Figura 3: Ubicación de los puntos de monitoreo (cotas referidas al cero Wharton).

De forma diaria (siempre que hubo actividad de dragado, transporte o disposición de sedimentos) se monitoreó la Turbiedad *in situ* y la profundidad de Disco Secchi, en dichos puntos. Como criterio de control ambiental de la actividad de dragado, la DINAMA estableció un límite de Turbiedad de 130 NTU (Nephelometric Turbidity Unit) en la media móvil de tres días, para cada punto de muestreo. El monitoreo se realizó en torno a las 13:00 hs, tomándose las muestras a media columna de agua aproximadamente.

En caso de que se superara dicho límite, en cualquiera de los puntos, el cuarto día se tomarían medidas sobre la intensidad y/o metodología de dragado, para reducir la resuspensión de sedimentos. De persistir la turbiedad por encima de ese valor, a pesar de las medidas tomadas, se detendrían las tareas hasta tanto se acordaran nuevas medidas.

2.3.2 Monitoreo en marco del Convenio UTE-IMFIA.

El objeto de este Convenio fue el monitoreo de parámetros físicos, químicos y biológicos en el Río de la Plata, en el entorno de la descarga del agua de enfriamiento de la central. El monitoreo buscó determinar las condiciones de dicha zona, de forma previa (línea de base), durante la construcción y durante un período de operación de la misma. Esto permitió identificar posibles cambios en los parámetros y variables monitoreadas, en el contexto de las variaciones naturales esperadas en esta zona del RdIP.

En particular, en la etapa de las obras marinas, el monitoreo se basó en la información recabada por los siguientes equipos, que permanecieron fondeados en una ubicación próxima a las obras de dragado (ver ubicación en Figura 4):

- Un perfilador acústico Doppler de corrientes (ADCP - Acoustic Doppler Current Profiler) para la medida de niveles y corrientes. Dicho equipo tiene la capacidad de “perfilar” la velocidad del agua a distintas profundidades de la columna.

Resuspensión de sedimentos por una obra de dragado en el Río de la Plata.

Caso: Central de Ciclo Combinado (UTE), Punta del Tigre, San José.

- Una sonda para registro (a una única profundidad) de Temperatura, Conductividad, Profundidad (CTD) y Turbiedad (Turbidímetro OBS, Optical Backscatter Sensor).

A los efectos del control de las obras de dragado, además de brindar la línea de base de valores de Turbiedad, este monitoreo brindó una serie continua de registros durante la ejecución de las obras. Esto permitió una evaluación *a posteriori*, de los posibles eventos de superación del límite establecido, en el contexto de las variaciones naturales del RdlP.

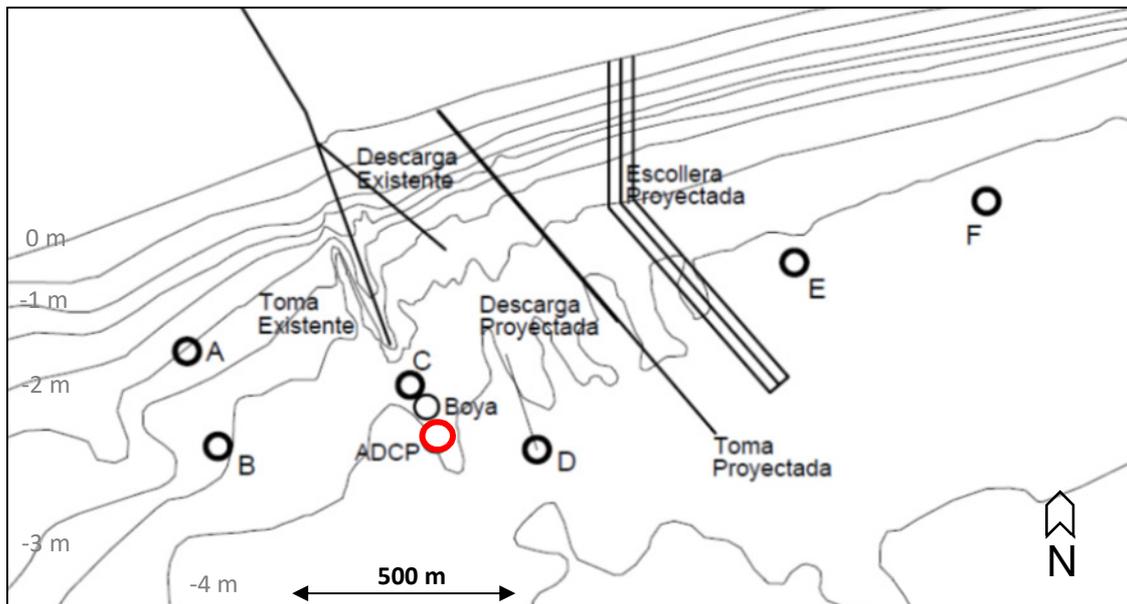


Figura 4: Ubicación del punto de emplazamiento del ADCP y el CTD+OBS (círculo de color rojo). Las letras de la A a la F corresponden a los sitios donde se realizaron muestreos discretos (cotas referidas al cero Wharton).

2.4 Información disponible al inicio de las obras.

2.4.1 Línea de base de calidad de agua.

La primera etapa del monitoreo realizado por UdelaR sirvió de línea de base de calidad de agua, para el análisis del monitoreo posterior, tanto durante las obras, como durante la operación de la central. Por otro lado, dicha información es la base de la descripción local del medio receptor que se presenta más adelante en este capítulo, brindando información específica del Río de la Plata en la zona de implantación de las obras.

El 3er informe de avance de este Convenio (IMFIA, 2016), resume prácticamente un año de monitoreo previo a las obras. En esta primera etapa se monitorearon parámetros hidrodinámicos, físicos, químicos y biológicos en la zona próxima a las obras, a través de los equipos fondeados y campañas de monitoreo en varios puntos (de A a F en la Figura 4).

A continuación, se resumen los principales parámetros monitoreados:

- ADCP: nivel, velocidad a distintas alturas y oleaje
- CTD + turbidímetro: conductividad, temperatura, profundidad y turbiedad (en una ubicación fija)
- Perfiles de parámetros físico-químicos: conductividad, temperatura y turbiedad (a distintas profundidades y en varios puntos)
- Muestras de sedimentos, de fondo y en suspensión

- Parámetros biológicos (fitoplancton, zooplancton, ictioplancton, zoobentos): muestras cuantitativas y cualitativas, identificación taxonómica, determinación de abundancia y riqueza relativas y biovolumen.
- Otros parámetros: clorofila a, ficocianina, análisis de cianotoxinas, penetración de la luz, salinidad, pH, alcalinidad, dureza, nitrógeno total, fósforo total, temperatura y oxígeno en superficie y fondo y transparencia de Disco Secchi
- Testigo de sedimentos para análisis paleoecológico

La medición de todas estas variables permitió profundizar en la caracterización del ambiente y los organismos presentes, así como detectar su variabilidad espacial, y temporal.

2.4.2 Previsión del aumento de la turbiedad durante la construcción.

A su vez, la empresa contratista encargada de ejecutar las obras realizó una evaluación previa para estimar el alcance del aumento de la turbiedad causada por las obras de dragado. Se realizó una campaña de 46 días (entre marzo y abril de 2013) que incluyó el monitoreo continuo de: corrientes, olas, mareas, temperatura, turbiedad y conductividad. A su vez, se realizó un relevamiento batimétrico, se tomaron muestras de sedimentos para análisis granulométrico y muestras de agua para determinación de la turbiedad.

Con la información recabada, se realizó la modelación de las plumas de sedimentos derivadas de las operaciones de dragado, mediante la aplicación de dos modelos: uno hidrodinámico (MIKE 3 HD) y uno de concentración de sedimentos (MIKE 3 PA), desarrollados por el DHI (Danish Hydraulic Institute, Dinamarca).

Se consideró que la mayor parte de las actividades de dragado se realizaría con una draga tipo “de corte” (o “cutterhead”)¹. Los resultados obtenidos se pueden resumir en las siguientes conclusiones presentadas en su informe final (GEOMETOCEAN Uruguay, 2013):

- Durante las actividades de dragado, aproximadamente el 50 % de la masa de sedimentos liberada en la columna de agua, llegaría al fondo del mar en un tiempo estimado de 1 min. Este fenómeno se asocia a la alta velocidad de sedimentación de los granos del sedimento y al hecho de que las operaciones se llevan a cabo en aguas poco profundas.
- Algo menos del 90 % del sedimento liberado en la columna de agua tardaría unos 10 min antes de alcanzar el fondo del mar. Así que una fracción menor de los sedimentos (la más fina) estaría disponible para el aumento de la turbiedad, por un par de horas.
- Las concentraciones máximas de sedimentos en suspensión disminuirían rápidamente con la distancia a la fuente. La concentración de sedimentos en suspensión decrecería unas 200 veces a 240 m de distancia del punto de generación. Para una concentración típica de 1000 a 1200 mg/l cerca del punto de generación, se esperaría de 5 a 6 mg/l a 240 m de distancia.

2.4.3 Estudios geotécnicos y caracterización del subsuelo marino.

Debido a la necesidad de analizar las características geotécnicas del fondo marino, para la fundación de las tuberías del sistema de enfriamiento, se realizaron ensayos de penetración y se tomaron muestras en 6 perforaciones, ubicadas sobre la traza de las tuberías.

Algunos de los resultados presentados en el informe “Offshore Geotechnical Soil Investigation” (INCOCIV srl, 2013) resultan de interés para este trabajo, dado que caracteriza los sedimentos encontrados en el subsuelo marino, aportando características macroscópicas (color, textura, concreciones, etc.), granulometría y análisis químicos, entre otros.

¹ Finalmente se utilizó una draga tipo “clamshell” (ver 5.1.1 Tipos de dragas.).

Resuspensión de sedimentos por una obra de dragado en el Río de la Plata.

Caso: Central de Ciclo Combinado (UTE), Punta del Tigre, San José.

En resumen, el perfil del subsuelo se caracteriza por las siguientes capas, según el Sistema Unificado de Clasificación de Suelos (SUCS):

- Una capa superior de unos 2m de potencia, caracterizada por arcillas pesadas, de alta plasticidad (CH), eventualmente con contenido de arenas, identificándose incluso arenas arcillosas (SC) en una de las perforaciones.
- Por debajo de la anterior se encuentra una capa de transición, de espesor variable hasta los 4m de profundidad. En tres perforaciones se encontraron arcillas de baja compresibilidad (CL), mientras que en las restantes se encontraron mezclas de arenas y limos con arcillas (SM-SC) o arenas pobremente gradadas (SP-SM).
- En todas las perforaciones menos una, a partir de los 5m aproximadamente, aparece una capa de arena limosa pobremente gradada (SP-SM), con un incremento en la densificación y presencia de conchas marinas petrificadas. Luego aparecen arenas, especialmente arenas limosas pobremente gradadas (SP-SM, SM y SP), muy densas, hasta el final de las perforaciones (15m aprox.).
- Únicamente en una perforación (la más próxima a la costa), entre los 7 y 13 m de profundidad, se encontró una capa de limo con gravas (ML) de color grisáceo y a partir de los 13m arenas limosas (SM) densas a muy densas, hasta el fondo de la perforación, a 17m.

Por otra parte, en el marco de los estudios llevados a cabo en Punta del Tigre por parte del IMFIA, cuatro muestras del sedimento extraído por la draga fueron objeto de un análisis granulométrico detallado. Dicho análisis fue realizado por el Laboratorio de Dinámica de Sedimentos Cohesivos de Rio de Janeiro, Brasil. Las muestras fueron analizadas mediante el uso de tamices y granulometría laser (para la fracción más fina) y los resultados fueron procesados con el software GRADISTAT ("A Grain Size Distribution and Statistics Package for the Analysis of Unconsolidated Sediments by Sieving or Laser Granulometer", Versión 8.0, S.J. Blott, 2010).

En términos generales se puede decir que dichas muestras correspondieron principalmente a limos (generalmente gruesos a muy gruesos), con distintos contenidos de arena (fina a muy fina) y con una pobre clasificación. En las figuras 5 y 6 se muestran las distribuciones de tamaño de granos obtenidas.

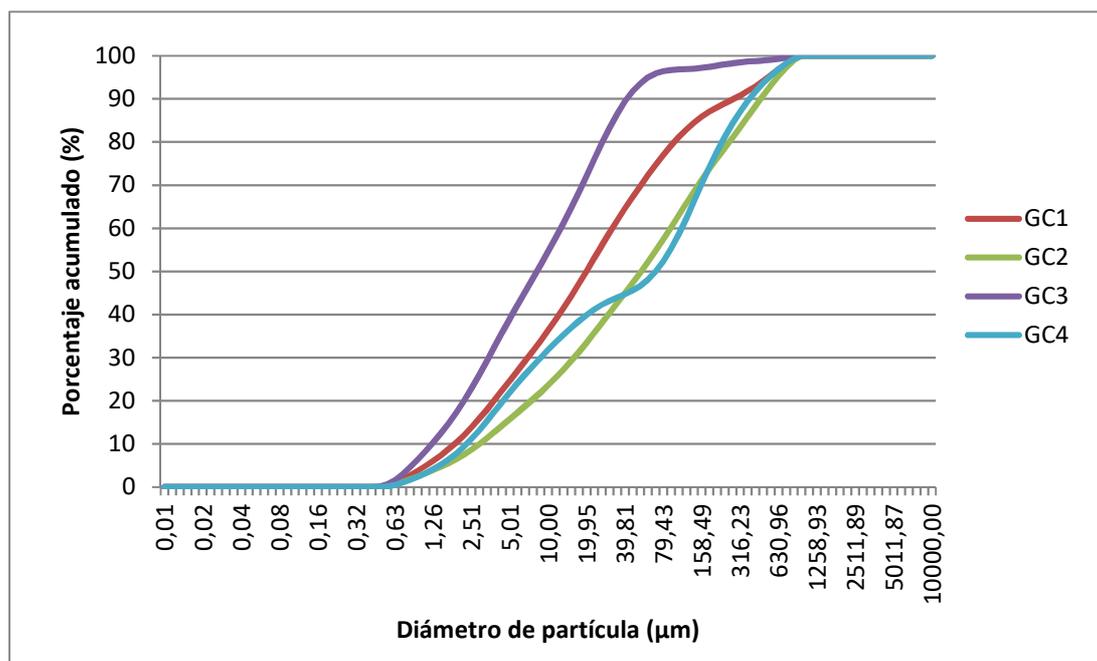


Figura 5: Distribución granulométrica acumulada para las 4 muestras analizadas.

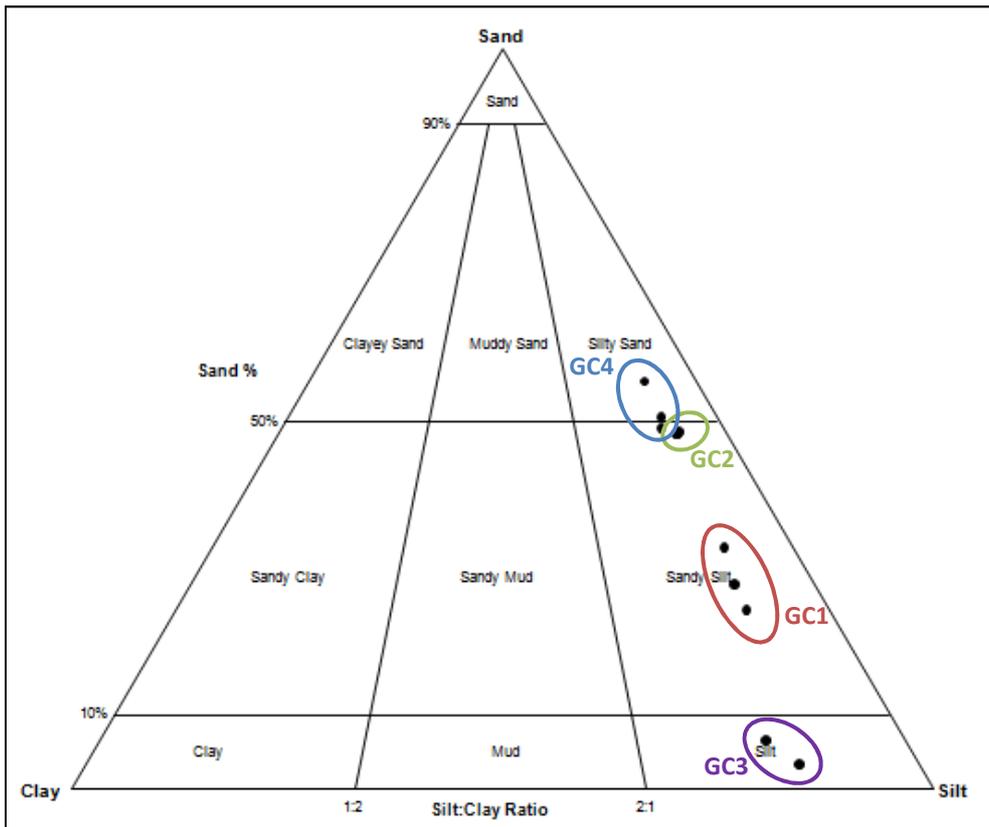


Figura 6: Ubicación de las 4 muestras en un diagrama triangular de distribución granulométrica (los puntos negros corresponden a distintos ensayos realizados a cada muestra).

3 Ambiente receptor.

Formalmente, el área de emplazamiento de las obras corresponde al extremo más occidental de la desembocadura del Río Santa Lucía. Sin embargo, a la hora de describir y analizar los procesos que determinan la hidrodinámica y la calidad de las aguas del medio receptor, se verá que el ambiente se ajusta, salvo a alguna particularidad local, a las características de Río de la Plata en dicha zona.

Para la descripción del medio receptor se utilizaron principalmente las siguientes fuentes de información:

- Los informes “El Río de la Plata, una revisión ambiental” (Proyecto EcoPlata, 1997) y “Análisis diagnóstico transfronterizo del Río de la Plata y su frente marítimo” (FREPLATA, 2005) para la descripción de las características y procesos más generales del río.
- 3er informe de avance del convenio UTE-IMFIA “Monitoreos hidrodinámicos y biológicos en el Río de la Plata en la zona de Punta del Tigre” (IMFIA, 2016), para la descripción más detallada de la zona de interés. Se tomó este informe debido a que fue considerado como “línea de base”, ya que los monitoreos fueron realizados de forma previa al comienzo de las obras marinas.

3.1 Ubicación.

El Río de la Plata está ubicado en la costa Este de Sudamérica, entre los 34°00'36"10' S y los 55°00'-58°10' W. Es el colector de la segunda cuenca hidrográfica más grande del continente, cubriendo 3.170.000 km, formada por los ríos Uruguay y Paraná-Paraguay (Figura 7).

Tiene aproximadamente 250 km de largo y cubre un área de alrededor de 38.800 km². La sección transversal se extiende hacia el sudeste, desde 40 km entre Colonia (Uruguay) y Buenos Aires (Argentina), 100 km entre Montevideo (Uruguay) y Punta Piedras (Argentina) y hasta 220 km entre Punta del Este (Uruguay) y Cabo San Antonio (Argentina) (Figura 8).

La zona costera donde se ubica el emprendimiento, denominada Ensenada de Santa Lucía (ver Figura 9) está limitada al Este por la desembocadura del Río Santa Lucía y al Oeste por el Banco de Santa Lucía, una barra arenosa con orientación Norte-Sur, que continúa la Punta del Tigre hacia aguas adentro.

La desembocadura del Río Santa Lucía tiene unos 8 km de ancho y se orienta en la dirección Norte-Sur, conformando una bahía orientada hacia el SW, de casi 15 km de largo (NW-SE) y 8 km de ancho máximo.

Resuspensión de sedimentos por una obra de dragado en el Río de la Plata.
 Caso: Central de Ciclo Combinado (UTE), Punta del Tigre, San José.

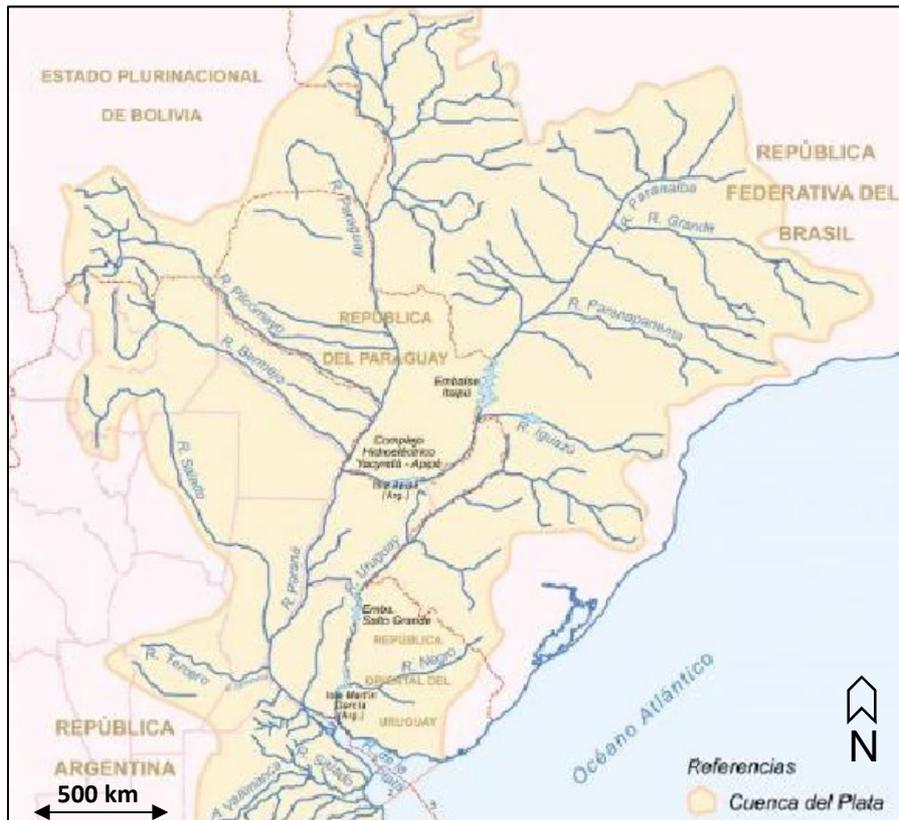


Figura 7: Ubicación general del Río de la Plata y su cuenca en América del Sur (<https://www.argentino.com.ar/cuenca-del-plata-hidrografia-republica-argentina-F1407C00519D6>).



Figura 8: Dimensiones del Río de la Plata (Fuente: modificado de https://es.wikipedia.org/wiki/Tratado_del_R%C3%ADO_de_la_Plata).



Figura 9: Punta del Tigre y desembocadura del Río Santa Lucía (Fuente: SOHMA, extracto carta náutica ROU8, cotas referidas al cero Wharton).

3.2 Marco hidro-geográfico general.

Algunas de las características generales, geomorfológicas e hidrológicas más relevantes del Río de la Plata son: un frente de delta en la zona interior; canales y bancos que encauzan las corrientes; una barra progresiva con depósitos sedimentarios relacionada con la dinámica de la intrusión salina; un ambiente de bahía poco profunda en la costa sur; un antiguo paleovalle en la costa norte; y una planicie arenosa marina sumergida sobre una gran boca oceánica abierta. En la Figura 10 se muestra una zonificación simplificada presentada por Proyecto EcoPlata (1997).

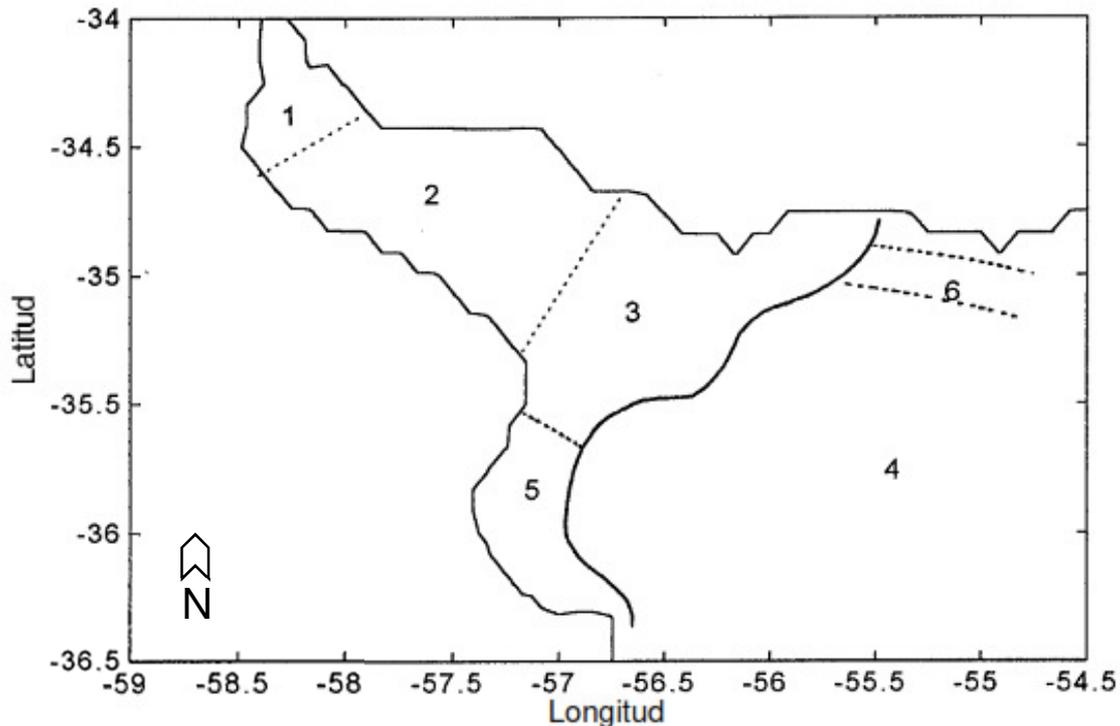


Figura 10: Esquema de zonificación morfo-hidrológica. 1: cuencas del Delta del Río Paraná, 2: río mareal, 3: transición estuarina, 4: región exterior o marina, 5: Bahía de Samborombón, 6: Canal Oriental Exterior (Fuente: Proyecto EcoPlata, 1997).

3.3 Geomorfología.

La topografía de fondo del Río de la Plata se caracteriza por la alternancia de bancos y planicies separados por canales más profundos. Las profundidades aumentan hacia la desembocadura del río, aunque no superan los 20 m (FREPLATA, 2005).

Según el citado trabajo (FREPLATA, 2005) las distintas características geomorfológicas definen áreas con rasgos particulares, que son caracterizadas como unidades morfológicas (Figura 11):

- **Playa Honda.** Es la prolongación subacuática del Delta del río Paraná y se presenta como una extensa área de bajos fondos atravesado por canales. El origen está relacionado con los materiales acumulados por deposición del material fluvial, que se deposita cuando la velocidad del agua decrece.
- **Sistema Fluvial Norte.** Este sistema incluye todos los canales que se extienden desde las cuencas de drenaje del Río de la Plata hasta Colonia. Se caracterizan por una serie de surcos generados por la acción erosiva de los ríos Uruguay y Paraná. Incluye canales, bancos longitudinales y dunas subacuáticas arenosas.
- **Banco Grande de Ortiz.** Se desarrolla sobre una gran porción del Río de la Plata entre el Canal Norte, cerca de la costa uruguaya y la Gran Hoya del Canal Intermedio. Se presenta como una amplia meseta con una pronunciada pendiente hacia el sur y tendida hacia el norte y el sudeste.
- **Gran Hoya del Canal Intermedio.** Es una extensa fosa hacia el sur del Banco Grande de Ortiz. Su diseño corresponde a condiciones de flujo y refluo.
- **Canal Norte.** Se extiende entre la costa uruguaya y el Banco Grande de Ortiz, con una profundidad próxima a los 5 m. Constituye una suave depresión vinculada a los canales del Sistema Fluvial Norte y representa el pasaje obligado de las corrientes de derrame paralelas a la costa.

Resuspensión de sedimentos por una obra de dragado en el Río de la Plata.

Caso: Central de Ciclo Combinado (UTE), Punta del Tigre, San José.

- **Canal Oriental.** Es una depresión alargada que se extiende con rumbo este-oeste, desde el Canal Norte (del que está separado por el Umbral de Cufré) hasta las proximidades de Punta del Este, donde su dirección cambia hacia el noreste.
- **Barra del Indio.** Es una planicie suave y amplia que se desprende en dirección noreste desde la costa argentina, entre Punta Indio y Punta Piedras. Morfológicamente posee una superficie subhorizontal, suavemente convexa. Se trata de una forma de agradación reciente formada por material arcilloso.
- **Franja Costera Sur.** Es el sector costero argentino, comprendido entre el río Luján y el Cabo San Antonio. Se presenta como un área con excepcionales condiciones para la recepción de sedimentos por estar ubicada a barlovento de los vientos dominantes, de forma que experimenta una baja energía de olas y por su relación con los mayores canales del río.
- **Alto Marítimo.** Es el sector exterior del Río de la Plata, que contiene a los Bancos Inglés, Arquímedes y Rouen. Los dos primeros constituyen zonas estables que actúan como dorsales o divisorias de aguas.
- **Umbral de Samborombón.** Es una superficie triangular que resulta de un cambio en la pendiente superficial interpuesta entre el centro de la Bahía de Samborombón y el Canal Marítimo.
- **Canal Marítimo.** Es una depresión extensa, con suave pendiente y un perfil asimétrico, que se encuentra entre la Barra del Indio, la Franja Costera Sur, el Umbral de Samborombón y el Alto Marítimo.



Figura 11: Morfología del Río de la Plata. (Fuente: FREPLATA, 2005)

Según esta caracterización, toda la ensenada del Río Santa Lucía queda comprendida en la unidad denominada Canal Oriental.

La geomorfología de la ensenada está determinada por: el arco de la costa al Norte, la desembocadura del Río Santa Lucía hacia el Este, y la presencia del Banco de Santa Lucía hacia el Oeste, generándose una zona de baja pendiente en dirección Sur (ver Figura 9).

En cuanto a la zona donde se emplazarán las obras, la batimetría realizada muestra un fondo con isobatas prácticamente paralelas a la costa, con una pendiente de aproximadamente 0,5%

Resuspensión de sedimentos por una obra de dragado en el Río de la Plata.

Caso: Central de Ciclo Combinado (UTE), Punta del Tigre, San José.

en dirección perpendicular (sobre la traza de las tuberías). Alejándose de las obras hacia el Oeste, se aprecia la curvatura de las isobatas debido a la presencia del Banco de Santa Lucía.

3.4 Sedimentos superficiales.

Los sedimentos de la superficie del fondo en el Río de la Plata, presentan un arreglo gradacional. Esto es, las arenas predominan en la cabecera del río, los limos predominan en la región intermedia y los limos arcillosos se encuentran cerca de la desembocadura de los ríos, donde se superponen a arenas constituidas por relictos del Holoceno (Urien, 1967).

En las regiones superior e intermedia, a lo largo de las costas, es posible distinguir dos asociaciones de facies, formadas por sedimentos de diámetro medio decreciendo hacia el sudeste. A lo largo de la costa norte, la descarga de los ríos Uruguay y Paraná, muestra una asociación de arenas y arenas limosas que pasan gradualmente a arenas limosas y limos en el Banco Grande de Ortiz, hasta limos, limos arcillosos e incluso arcillas limosas en el río exterior (Proyecto EcoPlata, 1997).

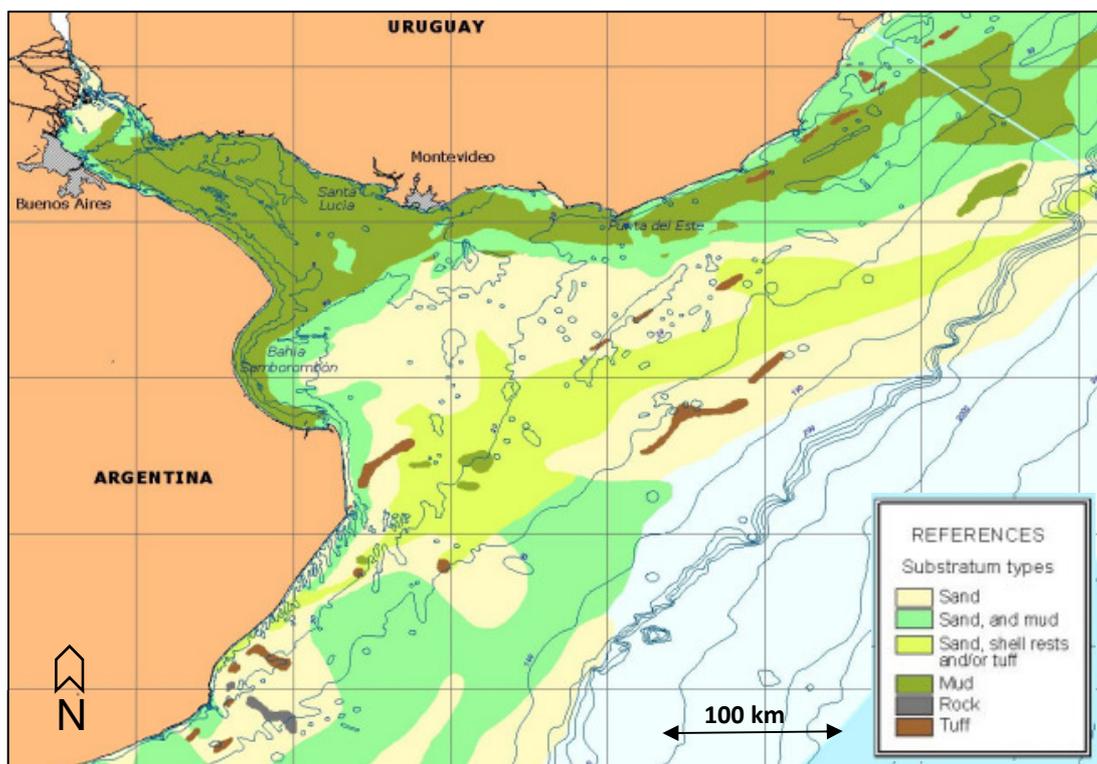


Figura 12: Distribución de sedimentos superficiales del Río de la Plata. (Fuente: FREPLATA)

Según el muestreo de sedimentos de fondo, realizado en el marco del Convenio UTE-UdelaR, para el estudio de zoobentos en Punta del Tigre, los mismos están compuestos principalmente por mezclas de limos y arenas gruesas, variando en tiempo y espacio. En algunos casos, la potencia del sedimento es muy baja, incluso llega a ser prácticamente nula, encontrándose un fondo duro arcillosos (IMFIA, 2016).

3.5 Entradas de agua al Sistema.

Más del 97% del total de entrada de agua al Río de la Plata es aportada por los ríos Paraná y Uruguay. El caudal fluvial del río Santa Lucía es insignificante respecto a la totalidad del sistema, aunque puede ser un factor local de importancia en la costa uruguaya. Aun cuando los dos grandes ríos poseen un patrón estacional, la variación porcentual es moderada, sus ciclos se oponen parcialmente y se compensan mutuamente, por lo que no existe un claro ciclo

Resuspensión de sedimentos por una obra de dragado en el Río de la Plata.

Caso: Central de Ciclo Combinado (UTE), Punta del Tigre, San José.

estacional. Las variabilidades medias, intra e interanuales, son pequeñas (Proyecto EcoPlata, 1997).

La descarga media del río Paraná para el período 1931-2001 fue de 16.000 m³/s, con extremos de 21.700 y 10.000 m³/s, mientras que la descarga media del río Uruguay, para el mismo período, fue de 4.700 m³/s, con extremos de 6.900 y 1.400 m³/s (FREPLATA, 2005). El Río Santa Lucía tiene una descarga media de unos 200 m³/s (UdelaR, 2011).

3.6 Régimen de marea y corrientes.

El sistema del Río de la Plata es un ambiente micromareal (amplitud mareal < 1 m), con un régimen semidiurno. La onda mareal oceánica está modificada en el RdIP por los vientos, la fuerza de Coriolis, la profundidad y la disminución de la sección transversal (Proyecto EcoPlata, 1997). El nivel del mar está menos influenciado por las mareas que por la fuerza del viento. Valores extremos, mayores de 3,5 m, han sido medidos durante la pasada de oleajes de tormenta en la costa.

El patrón de corrientes está regido por la interacción del régimen semidiurno de la marea (tanto astronómica como meteorológica), que genera una oscilación de 12 h (con una inversión del sentido de la corriente cada 6 horas en todo el Río de la Plata), con el caudal fluvial de los ríos Paraná y Uruguay y los vientos (IMFIA, 2016).

Durante el período de registro en Punta del Tigre, se registraron intensidades de corriente de hasta 0.55 m/s (IMFIA, 2016). Se observó que el forzante astronómico impone un ciclo semidiurno en los niveles, en el orden de los 0,5 m de amplitud, al que se superponen variaciones de nivel, en ocasiones mayores a 1 m de amplitud, asociadas a eventos meteorológicos.

3.7 Marco atmosférico y climático.

Tanto la forma, como la extensión y el régimen micromareal del Río de la Plata intermedio, determinan que los procesos atmosféricos, especialmente el régimen de vientos, jueguen un papel importante en la dinámica del agua y del sedimento móvil en el sistema. Varias características, tales como los patrones de circulación y estratificación, la altura del nivel del mar, condiciones de oleaje y el comportamiento de los sedimentos son en gran medida controladas por el alcance, la regularidad y la intensidad del viento, incluso cuando las condiciones no son de tormenta. El Río de la Plata está situado bajo la influencia del anticiclón del Atlántico sur. Por lo tanto, sus patrones anuales climáticos dependen principalmente de la posición de esta característica de circulación general. La velocidad promedio anual del viento se eleva a cerca de 5 m/s en la costa. Una mayor velocidad del viento se puede encontrar en las partes expuestas del litoral Atlántico (Proyecto EcoPlata, 1997).

En el siguiente gráfico (Figura 13) se presenta la rosa de vientos correspondiente a un punto cercano a Punta del Tigre (34° 52' 30" S, 56 ° 30' 00" W), en base de datos de re-análisis atmosférico global, para el período 2000-2015, producido por el Centro Europeo de Pronósticos Climáticos (ECMWF) (IMFIA, 2016). Se puede observar la predominancia de los vientos del E y NE, con velocidades medias del orden de 5 m/s.

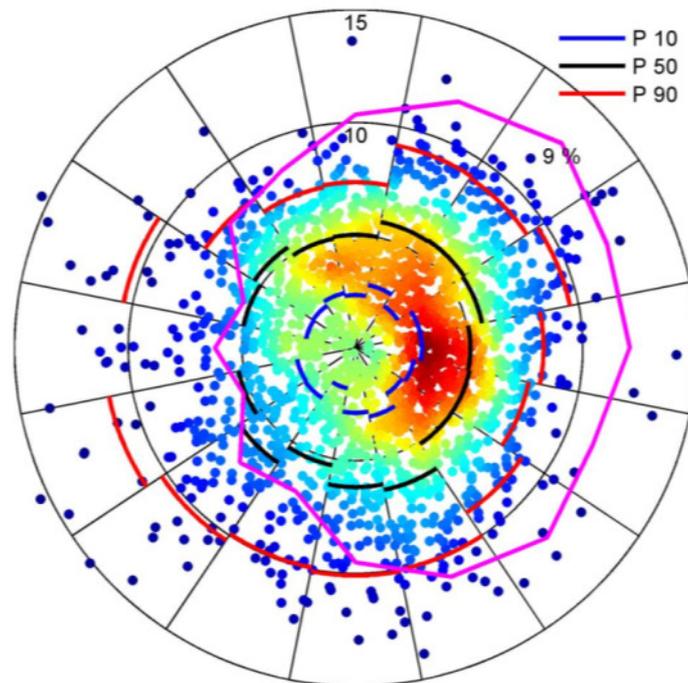


Figura 13: Distribución de velocidades de viento a 10 m de altura en m/s, en coordenadas 34° 52' 30" S, 56° 30' 00" W. Los colores indican la abundancia del dato en la serie registrada, colores más cálidos indican más eventos registrados en ese rango (Fuente: IMFIA, 2016)

3.8 Cuña salina – estratificación.

El Río de la Plata tiene un tiempo medio de renovación (Q/V , caudal sobre volumen) de aproximadamente tres meses. La razón estimada entre caudal fluvial y prisma de marea², es cercana a aquellos cuerpos que están mezclados verticalmente (Nagy, 1989). Según Dyer (1973) la razón entre la profundidad y la amplitud mareal es un índice de mezcla vertical. Ésta varía entre 6 y 10 en la Bahía de Samborombón, una zona levemente estratificada y a menudo bien mezclada, mientras que alcanza y puede exceder los 50-100 en las secciones más bajas del Canal Oriental, una zona a menudo altamente estratificada (Proyecto EcoPlata, 1997).

En el Canal Oriental, la morfología y la fuerza de Coriolis promueven la salida fluvial y la intrusión marina, creando un caudal de dos capas y una fuerte estratificación con una o dos haloclinas (Nagy et al., 1987). La primera (descarga de la haloclina) está asociada con la salida fluvial y su profundidad varía con el caudal fluvial, la marea y la mezcla turbulenta por viento. La última (intrusión de la haloclina) está asociada con la entrada de agua del fondo y la profundidad de la mezcla por mareas y/o por vientos. Entre ellas se encuentra una capa de mezcla turbulenta.

No sólo el perfil de salinidad, sino también los perfiles de temperatura, oxígeno y turbiedad se relacionan con este patrón vertical (Figura 14). La distribución longitudinal de la salinidad también puede variar mucho. Sin embargo, ésta muestra una zona frontal que normalmente está ubicada entre las secciones de Punta Brava y Punta del Tigre (Nagy et al., 1987).

² El prisma de marea se define como el “volumen de agua intercambiado entre un estuario y el mar abierto durante un ciclo de marea completo”. Fuente: Real Academia de Ingeniería (<http://diccionario.raing.es/es/lema/prisma-de-marea>).

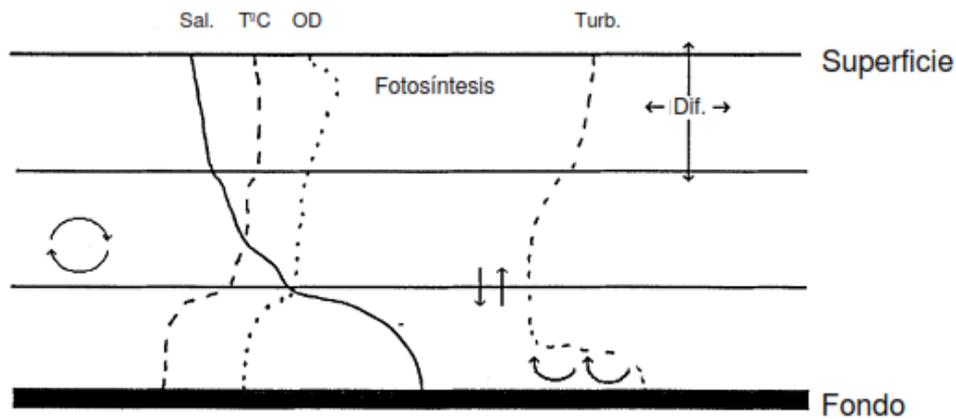


Figura 14: Modelo conceptual de la zona “Canal Oriental”. Se muestran los patrones dominantes de la estructura de densidad vertical en relación con la salinidad, turbiedad, temperatura y distribución de oxígeno disuelto (Fuente: Nagy et al, 1987).

El comportamiento de la cuña salina está controlado por el caudal fluvial en el plazo medio (estacional) y a largo plazo (anual), por el viento en el corto plazo (diario a semanal) y por la marea a cada hora. En general, mayores caudales fluviales incrementarían la estratificación vertical del campo salino, pero no se observa esta relación sobre la costa uruguaya, por lo que es probable que el viento tenga una mayor incidencia sobre esta zona (IMFIA, 2016).

De acuerdo a Mianzán et al. (2002), Punta Tigre estaría definiendo el límite exterior de la zona del río correspondiente a agua dulce, lo cual se puede observar en la siguiente figura.

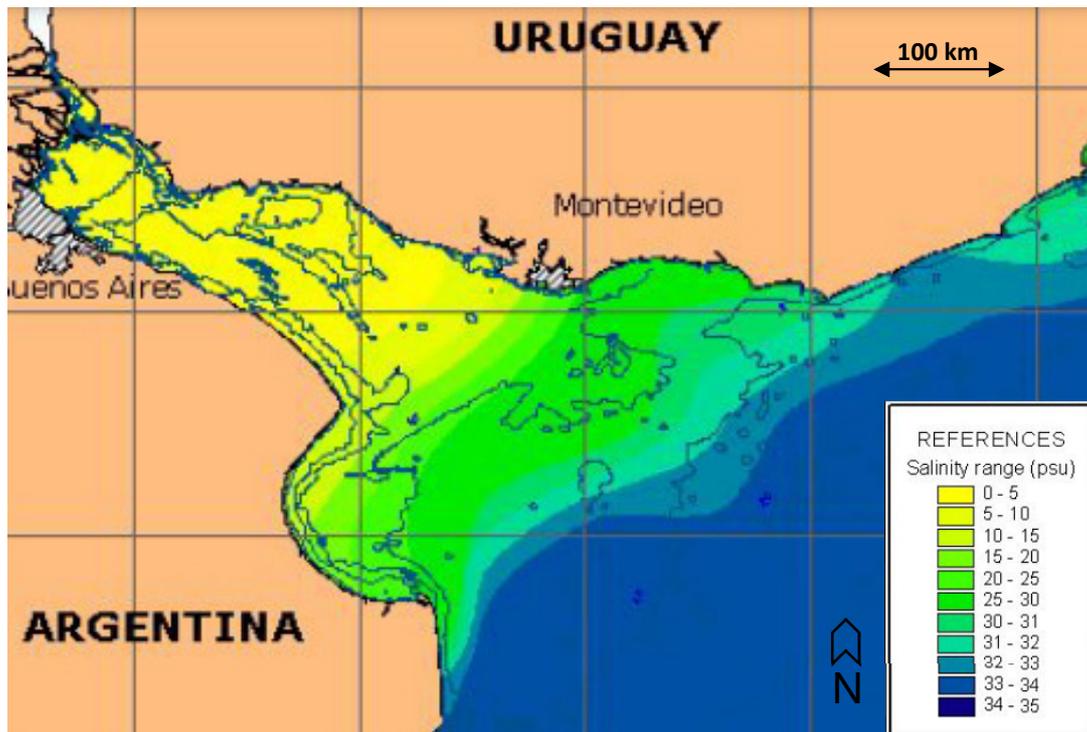


Figura 15: Distribuciones de salinidad en superficie (Fuente: FREPLATA).

Según los resultados del monitoreo realizado por el IMFIA en Punta del Tigre (IMFIA, 2016), la salinidad se encontró la mayor parte del tiempo por debajo de 5 PSU, sin embargo, ese valor fue superado, durante períodos de relativa corta duración, por valores de hasta 25 PSU, indicando la intrusión de agua salada en la zona. En la Figura 16 se presenta una porción de la serie de salinidad registrada (entre marzo y mayo de 2015), donde se puede observar esta gran

variabilidad. La variabilidad temporal de los registros de salinidad en la zona, muestran una dinámica muy particular y compleja, influenciada por la dinámica global de la cuña salina del Río de la Plata y posiblemente, en menor medida, por la dinámica local de la pluma del Río Santa Lucía.

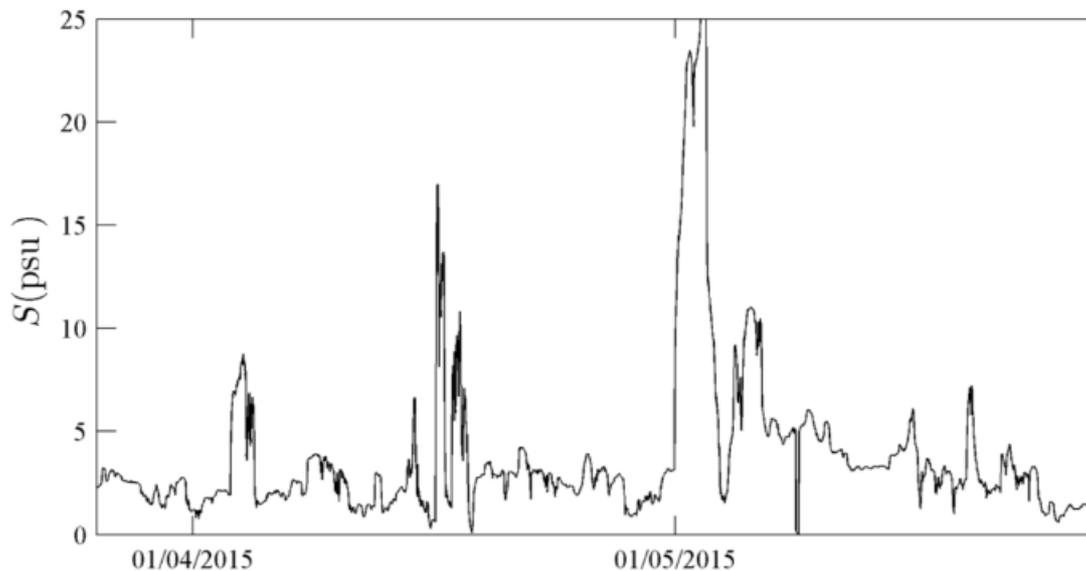


Figura 16: Variabilidad de la salinidad en Punta del Tigre (Fuente: modificado de IMFIA, 2016).

3.9 Turbiedad.

El río Paraná aporta la mayor parte de los sedimentos suspendidos, con 160 millones de toneladas al año de arena fina, limo y arcillas. La arena se deposita principalmente en la zona próxima a la descarga de los principales afluentes y son los sedimentos más finos los que alcanzan la zona exterior (IMFIA, 2016).



Figura 17: Fotografía satelital del Río de la Plata (Fuente: https://es.wikipedia.org/wiki/R%C3%ADo_de_la_Plata).

El frente de turbiedad está estrechamente relacionado al de la salinidad. Cuando las isohalinas muestran un gradiente muy pronunciado, la extensión del frente puede tener una longitud menor a 25 km, pero generalmente es de 30 a 40 km. En la costa norte se observa frecuentemente una pluma turbia, asociada a la salida de aguas menos salinas, de 30 a 60 km de largo o más (Proyecto EcoPlata, 1997).

Farmiñan y Brown (1996) estudiaron el comportamiento del frente de turbiedad por un período de 4 años, usando imágenes satelitales. Algunas de las conclusiones a las que llegaron es que la distribución media del frente de turbiedad está controlada por la topografía del fondo y que las variaciones estacionales responden a la descarga fluvial y a las características del campo de vientos.

El frente alcanza su ubicación más occidental durante el verano, con una descarga mínima y vientos predominantes del NE y E. En primavera, con vientos fuertes del SW, el frente alcanza su posición más oriental a lo largo de la costa uruguaya. Durante la máxima descarga del otoño e invierno, la distribución es bimodal, con máximos en ambas costas y una variabilidad más alta en la región central (Proyecto EcoPlata, 1997).

El registro continuo de turbiedad, obtenido durante el monitoreo realizado por el IMFIA en Punta del Tigre, arrojó un valor medio próximo a las 40 NTU, con valores que superan ampliamente las 200 NTU durante eventos de tormenta. Por otra parte, se observan periodos de más de 10 días seguidos, en que la turbiedad se mantiene muy por debajo del valor medio. Un ejemplo de estas variaciones se puede apreciar en la siguiente figura (IMFIA, 2016).

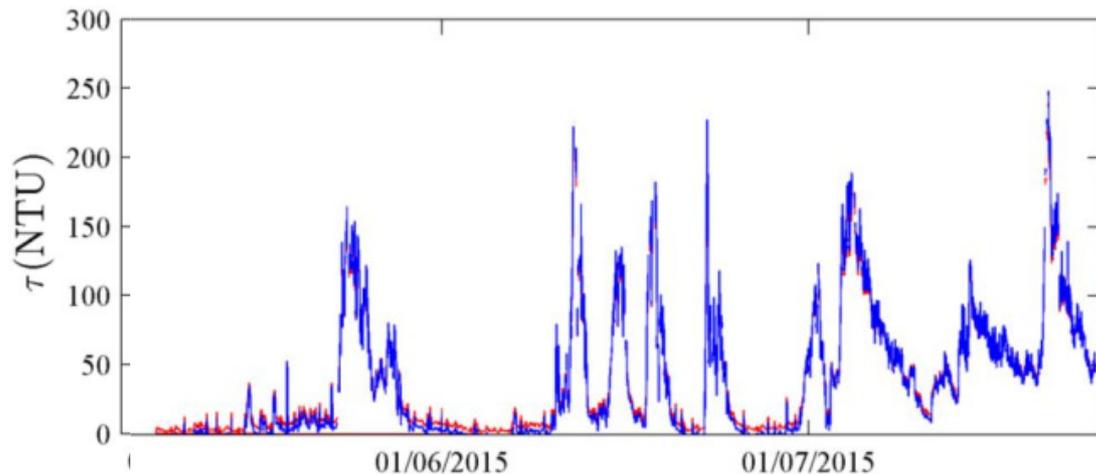


Figura 18: Porción de la serie de turbiedad (Fuente: modificado de IMFIA, 2016). Los colores corresponden a los sensores de baja y alta intensidad de luz del OBS (Roja=rango bajo del OBS; Azul=rango alto del OBS)

Los picos de turbiedad en el área están generalmente asociados a aumentos de nivel y de altura de ola, indicando que están provocados por la resuspensión de sedimentos finos durante las tormentas. Los sedimentos “suelos” que se encuentran sobre el lecho en la zona de fondeo de los equipos de monitoreo, están compuestos principalmente por arenas medias a gruesas, por lo que, el aumento de la turbiedad puede atribuirse a material más fino que ingresa en suspensión al punto de medición (IMFIA, 2016).

En el área estudiada, tanto los perfiles de turbiedad realizados, así como el análisis del retorno acústico del ADCP, muestran una columna de agua generalmente bien mezclada, sin estratificación significativa. Es posible que esporádicamente pueda encontrarse cierta estratificación, asociada a eventos de calma meteorológica, pero no parece ser el comportamiento general de la zona de estudio. Los periodos de baja salinidad, coinciden con un mayor nivel de turbiedad y durante los periodos de aumento de salinidad, la turbiedad cae a sus valores mínimos, próximos a cero (IMFIA, 2016).

3.10 Temperatura.

La temperatura del Río de la Plata puede aumentar o disminuir con la profundidad, lo que está relacionado estrechamente con la estratificación. El análisis de temperatura y salinidad muestra la presencia de las dos influencias oceánicas dominantes en las aguas mezcladas adyacentes a la plataforma: aguas subantárticas frías (de otoño a finales de primavera) y aguas subtropicales cálidas (de finales de primavera a otoño). La temperatura del agua de la capa superficial sigue estrechamente la temperatura del aire, mientras que el agua salina del fondo muestra un comportamiento casi conservativo (Proyecto EcoPlata, 1997).

Durante el período de monitoreo en la zona de estudio, pudo verse primero un aumento continuo de la temperatura, alcanzando los 25 °C a inicios de enero de 2015. Luego permaneció en el entorno de 25 °C, hasta mediados de marzo de 2015 y luego descendió hasta los 11 °C a fines de julio de 2015. Desde allí comenzó nuevamente a ascender y se estabilizó en el entorno de los 15°C hasta finales de octubre de 2015, para luego aumentar nuevamente hasta los 25 °C a mediados de diciembre. La mínima temperatura registrada fue de 9,6 °C y la máxima de 29,1 °C (IMFIA, 2016).

3.11 Oleaje.

El oleaje en la zona de Punta del Tigre puede considerarse dominado por el mar de viento (sea), con un mar de fondo (swell) muy débil o inexistente (IMFIA, 2016). Se observa que, en el período

de medición, la máxima altura de ola registrada fue de 2,22 m, mientras que la máxima altura de ola significativa fue de 1,41 m. Los periodos del oleaje promedio de cruce por cero llegaron a los 5 s.

Los mayores eventos registrados ($H_s > 1$ m) corresponden a oleaje proveniente mayoritariamente del S-SE, dirección perpendicular a la costa. En la Figura 19 (IMFIA, 2016) se presentan los registros de altura de ola significativa obtenidos durante el período de monitoreo. Se puede ver que el oleaje más frecuente también proviene del S-SE, con el 35 % de los registros proviniendo de este sector, y que junto a la dirección SE acumulan el 62 % de los registros de oleaje.

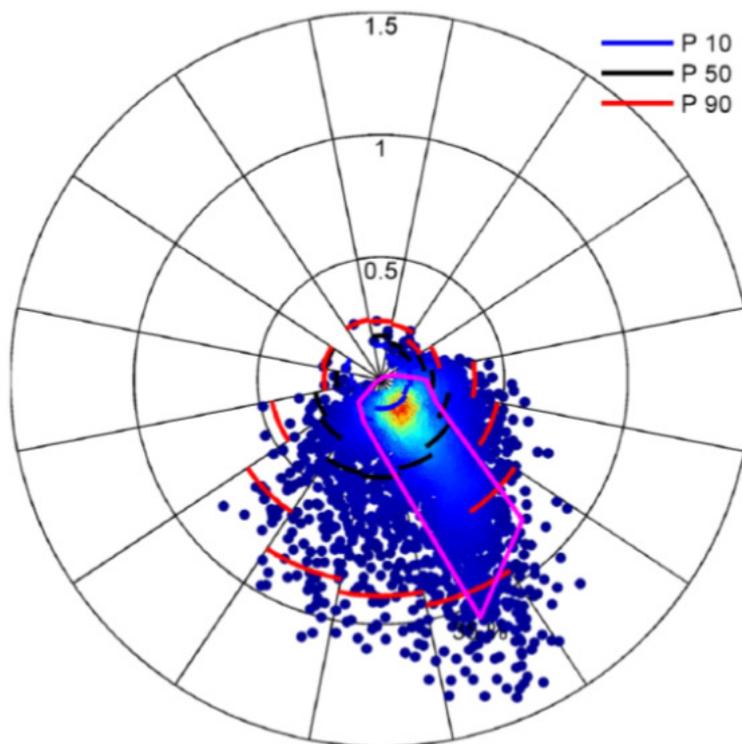


Figura 19: Altura de ola significativa según la dirección de la que proviene el oleaje, de acuerdo a la dirección media del mismo. Los colores indican la abundancia del dato en la serie registrada, colores más cálidos indican más eventos registrados en ese rango (Fuente: IMFIA, 2016).

3.12 Biota.

La gran heterogeneidad ambiental del Río de la Plata, en términos de masas de agua (cálidas, templadas, frías, dulces, saladas y salobres), fisiografía (islas, puntas rocosas, marismas, playas arenosas, barrancas, lagunas costeras) y geología (fondos arenosos, limosos, arcillosos) genera una extensa variedad de hábitats que son utilizados por una gran diversidad de especies. (FREPLATA, 2005).

Entre los organismos que habitan el Río de la Plata se encuentran aquellos sin capacidad de locomoción, o con una capacidad limitada, y por tanto sujetos a los movimientos del agua, que conforman el plancton, aquellos del necton que son capaces de moverse por sí mismos, y los que viven dentro o sobre el sedimento y son por tanto poco móviles pero independientes del movimiento del agua, que conforman el bentos (IMFIA, 2016).

Dentro del plancton a su vez se distingue un bacterioplancton, que incluye bacterias heterótrofas y autótrofas, como las cianobacterias, un fitoplancton conformado por microalgas (clorofitas, diatomeas, etc.), protozooplancton (ciliados, flagelados) micro y mesozooplancton (rotíferos, microcrustáceos y meroplancton entre otros) y un ictioplancton, formado por huevos

y larvas de peces. Dentro del bentos puede haber también representantes algales (fitobentos) si la luz llega al fondo, acompañado de un bacteriobentos y un zoobentos compuesto por diversos grupos de invertebrados (anélidos y moluscos). Estos organismos son vulnerables a las condiciones ambientales, tanto en lo que se refiere a las características físico-químicas de su hábitat como a factores biológicos como la variabilidad en la disponibilidad de nutrientes, cantidad y calidad del alimento y a la presencia de predadores (IMFIA, 2016).

3.12.1 Fitoplancton

Los taxones predominantes en el Río de la Plata, desde el punto de vista de la abundancia y la diversidad, son las diatomeas y los dinoflagelados, aunque las floraciones algales registradas involucran mayoritariamente a dinoflagelados. La productividad, estimada en base a mediciones de clorofila "a" indican que el sistema es de productividad media a alta. Esta productividad es influenciada por la riqueza de sedimentos de las aguas del río y por la mezcla en la plataforma con aguas marinas subantárticas ricas en nutrientes. Los resultados del monitoreo realizado en la zona de Punta del Tigre confirmaron la predominancia de diatomeas estuarinas, lo que indica el tipo de ecosistema y condiciones lumínicas dominantes (alta mezcla y baja disponibilidad de luz). Los biovolúmenes de fitoplancton registrados fueron en general muy bajos (<1 mm³/L). En los meses de diciembre y febrero se registraron floraciones de cianobacterias potencialmente tóxicas, favorecidas por el aumento de la temperatura del agua, la mayor duración del fotoperiodo e intensidad lumínica. Estos fenómenos se repiten a lo largo de la costa del Río de la Plata la mayoría de los años (IMFIA, 2016).

3.12.2 Zooplancton

La distribución de especies (principalmente copépodos, cladóceros, cirripedios, chaetognatos e ictioplancton.) es altamente influida por el gradiente y la estratificación de salinidad y turbiedad a lo largo del río. El rango de especies va desde aquellas características de aguas subantárticas a subtropicales. Las poblaciones de zooplancton pueden ser altamente variables, en respuesta a cambios en las condiciones hidrológicas que están dominados por la estratificación térmica y química (nutrientes y salinidad) y la transparencia y contenido de oxígeno (Proyecto EcoPlata, 1997).

La comunidad zooplanctónica en el área monitoreada mostró una estructura comunitaria diferente en cada muestreo, en cuanto a la composición y abundancias de cada grupo analizado, lo cual no resultó extraño debido a la gran variabilidad que presenta el RdIP durante todo el año. Sin embargo, la riqueza de especies hallada durante este monitoreo resultó sumamente baja, presumiblemente debido a que la zona de estudio se encuentra próxima al límite de la zona fluvio-marina, donde la diversidad tiende a ser baja, ya que sólo pocas especies pueden sobrevivir a esa variabilidad ambiental (IMFIA, 2016).

3.12.3 Zoobentos

La zona intermedia del RdIP, de La Plata (Argentina) y Colonia (Uruguay) a Punta Piedras y Punta Brava, es la región en la cual se mezclan las aguas dulces y saladas (ver Figura 20). Esta zona estuarina, que varía en el grado de estratificación de la columna de agua, incluye una zona de alta turbiedad (el máximo) y está, en consecuencia, habitada por especies con relativamente amplias tolerancias a los cambios en salinidad, temperatura y concentraciones de sedimentos en suspensión (Proyecto EcoPlata, 1997).

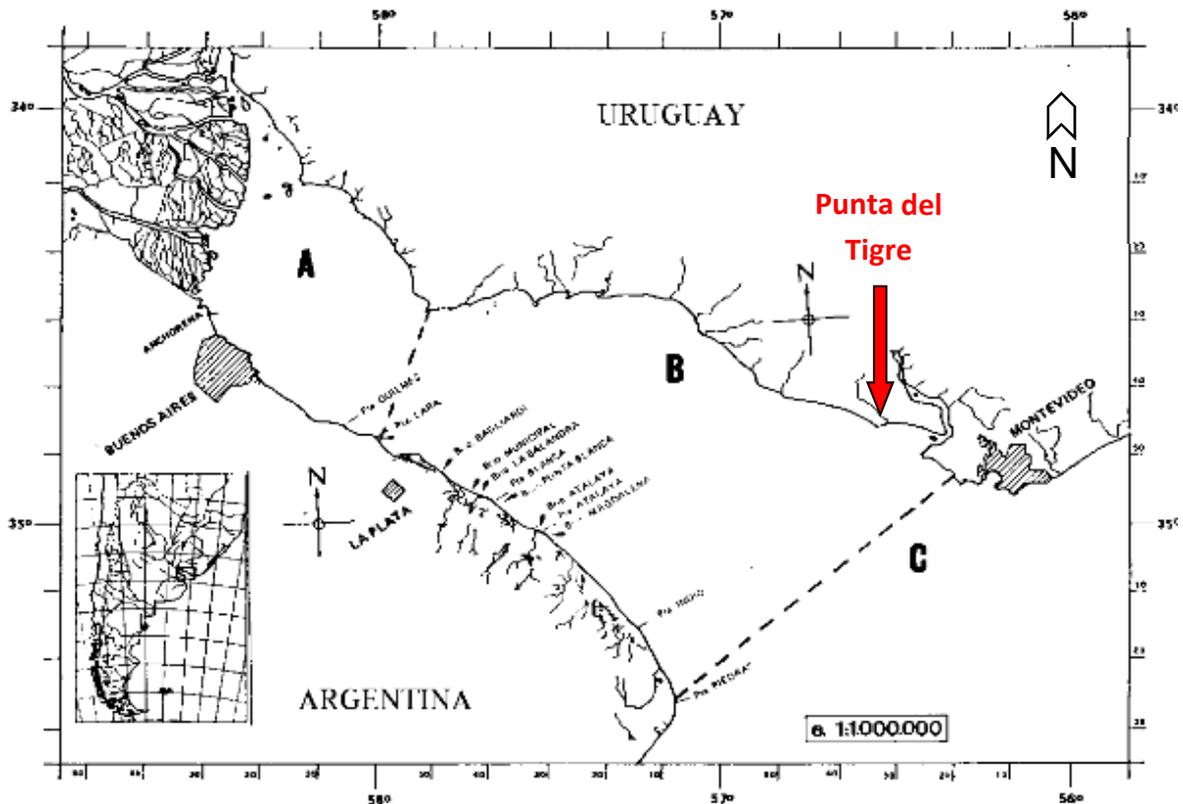


Figura 20: Río de la Plata – Zona fluvial. A: zona fluvial interna, B: zona fluvial media, C: zona fluvial marina (Fuente: Proyecto EcoPlata, 1997).

El tipo de sedimento presente en el área de Punta del Tigre es muy variable, tanto espacial como temporalmente, debido a la elevada dinámica de la zona. En consecuencia, el zoobentos es igualmente variable y, por lo tanto, las comunidades bentónicas son poco abundantes y poco diversas, ya que solo algunas especies pueden adaptarse a dichas condiciones. Los resultados del monitoreo han mostrado una baja diversidad, con una dominancia clara de *Erodona mactroide* (bivalvo). También fueron registrados *Nephtys fluviatili* y *Laeonereis culata*, (poliquetos) y *Tubifex tubifex* (oligoqueto) y *Limnoperma fortunei* (bivalvo) (IMFIA, 2016).

3.12.4 Peces

La fauna de peces del Río de la Plata está compuesta por dos grupos principales, de agua dulce y de origen marino. También aparecen algunas especies anádromas (que migran río arriba) como *Lycengraulis grossidens* (anchoa de río) o *Netuma barbuis* (mochuelo). Los principales grupos taxonómicos del Río de la Plata son los *Characiformes* y los *Siluriformes*. Una característica importante a destacar es que la mayoría de estas especies son estenohalinas, o sea que sólo son capaces de vivir en un estrecho rango de concentración de sales (un cambio en la salinidad del medio impide su crecimiento) (Proyecto EcoPlata, 1997).

Las especies de peces marinos que se pueden encontrar en el RdIP, mayormente corresponden a especies subtropicales-templadas, siendo las más representativas aquellas especies que habitan sobre fondos arenosos o fangosos, tales como las de la Familia *Sciaenidae* (corvinas). En la parte superior del río, donde predominan las especies de agua dulce y los fondos están compuestos por fangos y arenas, las familias que más abundan son los *Curimatidae*, los *Pimelodidae* y los *Loricariidae*, las cuales poseen un hábitat alimentario relacionado con esos tipos de fondos. En las secciones media y baja, empiezan a aparecer especies de origen marino, siendo las especies más abundantes en esta parte del río los *Sciaenidae*, los *Rajidae* y los *Myliobatidae*. (Proyecto EcoPlata, 1997).

Resuspensión de sedimentos por una obra de dragado en el Río de la Plata.

Caso: Central de Ciclo Combinado (UTE), Punta del Tigre, San José.

La desembocadura del Río Santa Lucía, así como la Barra del Indio y la Bahía Samborombón, son áreas de reproducción y cría para muchas especies, incluyendo algunas de gran interés económico en la región, como la corvina rubia (*Micropogonias furnieri*) (FREPLATA, 2005) (ver Figura 21 y Figura 22). En particular, de acuerdo a Lasta (1995) y Wells & Daborn (1997) (citados por FREPLATA, 2005), la boca del río Santa Lucía es un área de cría principal para *Micropogonias furnieri* (corvina rubia) y *Brevoortia aurea* (lacha), *Pogonias cromis* (corvina negra), *Odonthestes spp.* (pejerrey), *Mugil liza* (lisa), *Macrodon ancylodon* (pescadilla) y *Paralichthys spp.* (lenguado), entre otros.

Micropogonias furnieri es un importante recurso industrial y artesanal que está sobreexplotado (Mianzan et al., 2001 y DINARA, 2014). Esta especie utiliza el Río de la Plata como área de reproducción y retención de huevos y larvas, procesos fuertemente asociados a la cuña salina de fondo (Berasategui et al., 2004; Acha et al., 2008; Braverman et al., 2009; citados por FREPLATA, 2005).

La distribución estacional de esta especie se encuentra estrechamente vinculada con su comportamiento reproductivo. El desove de la corvina en el RdIP tiene lugar principalmente entre octubre-noviembre y marzo-abril (Macchi, Acha, & Militelli, 2003). En primavera y verano se registran importantes concentraciones de adultos desovantes en las costas de Montevideo y Canelones. Allí las aguas son someras, con profundidades de 5 a 10 m, de escasa salinidad y con fondos de arena o fango. También se encuentran concentraciones de desovantes en las desembocaduras de ríos o arroyos, por ejemplo, en la del río Santa Lucía. (UTE, 2011). En las siguientes figuras se presentan las distribuciones históricas de huevos y larvas de corvina rubia en el Río de la Plata.

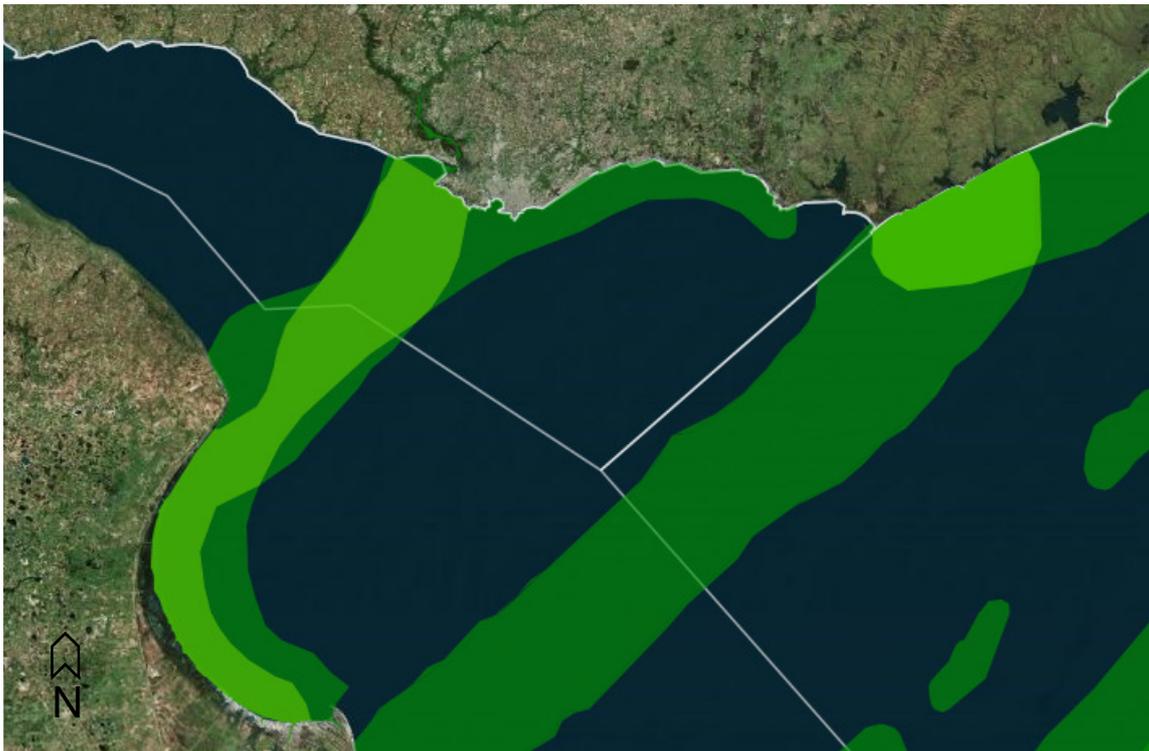


Figura 21: Áreas de cría y reproducción de peces demersales. Fuente: Ministerio de Ambiente - Visualizador de mapas (<https://www.ambiente.gub.uy/visualizador/index.php?vis=sig>).

Resuspensión de sedimentos por una obra de dragado en el Río de la Plata.
 Caso: Central de Ciclo Combinado (UTE), Punta del Tigre, San José.

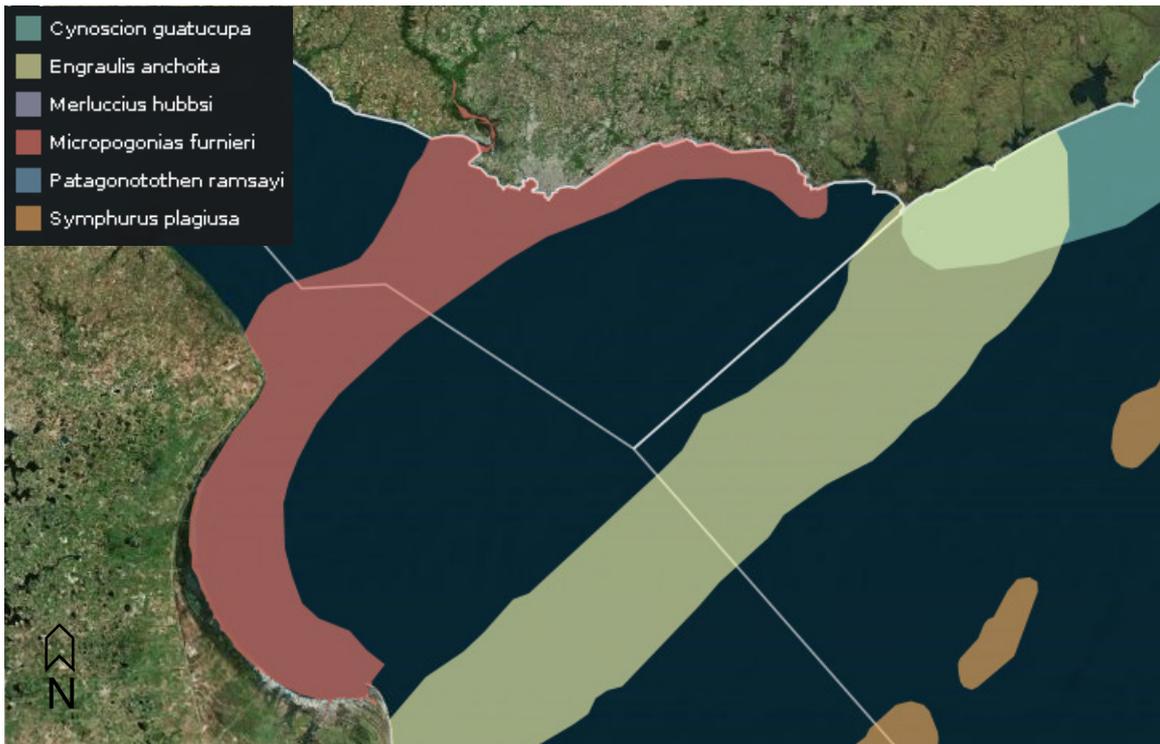


Figura 22: Áreas de desove de especies nectónicas. Fuente: Ministerio de Ambiente - Visualizador de mapas (<https://www.ambiente.gub.uy/visualizador/index.php?vis=sig>).

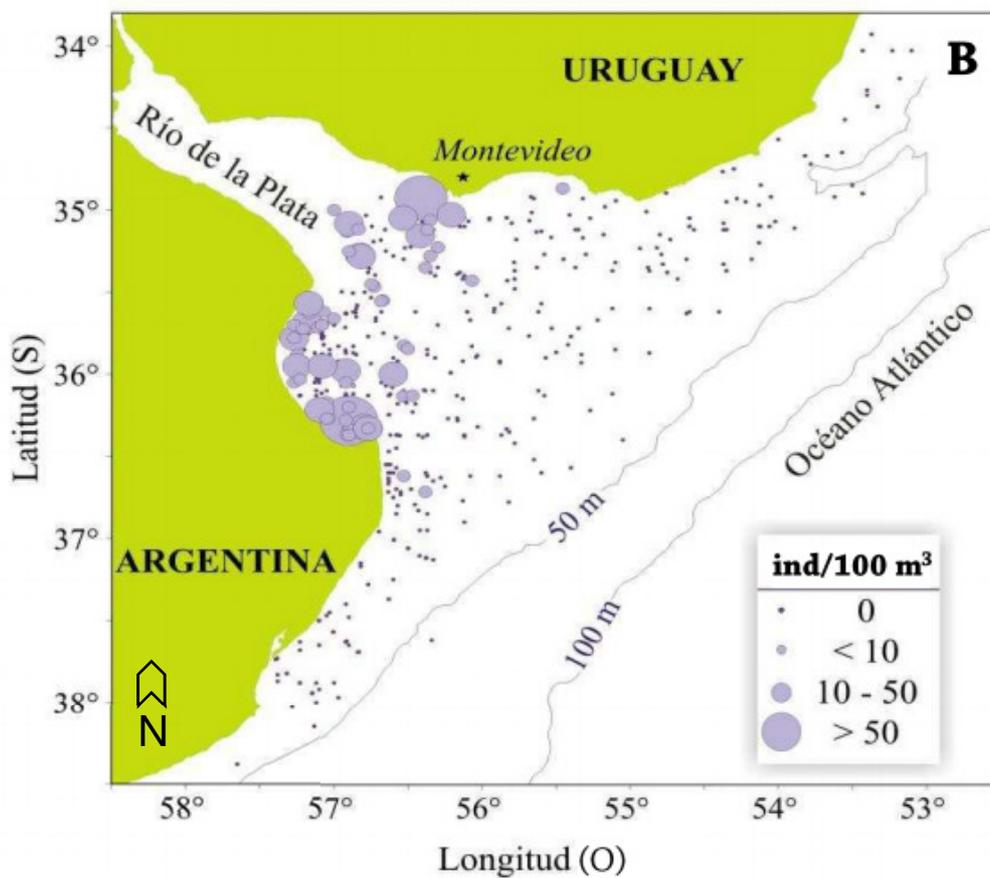


Figura 23: Distribución histórica de larvas de corvina rubia (Braverman, 2011)

Resuspensión de sedimentos por una obra de dragado en el Río de la Plata.

Caso: Central de Ciclo Combinado (UTE), Punta del Tigre, San José.

Los resultados obtenidos de las campañas de muestreo de larvas y huevos de peces en Punta del Tigre, realizadas en el marco del Convenio UTE-UdelaR, indican la ocurrencia de ictioplancton en la zona, asociada en algunos casos a eventos reproductivos y en otros al uso de esta área como sitio de alimentación o cría de larvas (IMFIA, 2016).

Durante estas campañas se identificaron 7 taxones de larvas de *Brevoortia aurea* (lacha), *Odontesthes bonariensis* (pejerrey), *Micropogonias furnieri* (corvina rubia o blanca), *Lycengraulis grossidens* (anchoa de río), *Cyprinus carpio* (carpa), larvas del Orden *Siluriforme* (bagres) y larvas de la Familia *Achiridae* (lenguados). La abundancia y presencia de los diferentes taxones variaron en todo el periodo de estudio, siendo la lacha la que estuvo presente en la mayoría de los períodos.

Por otra parte, durante las primeras pruebas del sistema de enfriamiento de la central, entre abril y mayo de 2018, la Dirección Nacional de Recursos Acuáticos (DINARA), realizó un análisis de los peces que quedaron retenidos en los sistemas de filtración. Estos individuos, generalmente juveniles, pertenecieron a las siguientes especies: *Micropogonias furnieri*, *Parapimelodus valenciennis* (bagre misionero), *Iheringichthys labrosus* (bagre trompudo), *Odontesthes bonariensis*, *Lycengraulis grossidens*, *Brevoortia aurea* y *Cynoscion guatucupa* (pescadilla de red), siendo la corvina y el bagre misionero las más abundantes en todos los muestreos (DINARA, 2018).

4 Impactos ambientales.

Muchas actividades humanas provocan eventos de resuspensión de sedimentos en cuerpos de agua, y su posterior sedimentación en el fondo, que difieren de los eventos naturales, en lugar y momento de ocurrencia, y en duración, extensión e intensidad. Las actividades de dragado son una de las causantes antrópicas de dichos eventos, produciéndose la resuspensión de sedimentos, tanto durante el dragado (ya sea de una nueva obra o mantenimiento de una existente), como durante el transporte y la disposición del material extraído. Todos los métodos de dragado, transporte y descarga, tienen el potencial para generar, directa o indirectamente, ciertos impactos negativos al ambiente. Esos impactos generan cambios en las características físicas, químicas y biológicas de los ecosistemas (Landaeta, 1995).

En este apartado se presenta una revisión de los impactos ambientales producidos por el dragado de sedimentos en cuerpos de agua, especialmente los asociados a la resuspensión y depósito de sedimentos. Los principales posibles impactos negativos son: impactos sobre la calidad del agua, impactos sobre peces, flora y otros organismos, cambios físicos del fondo marino y suspensión y distribución de contaminantes asociados a los sedimentos.

Esta revisión se centrará en los impactos negativos, aunque no todos los efectos de los sólidos suspendidos son necesariamente negativos para todos los organismos acuáticos. Por ejemplo, existen organismos que se desarrollan en aguas con alto contenido de sólidos o donde se pueden producir naturalmente importantes variaciones de concentración, como pueden ser los ambientes estuarinos (Cyrus & Blaber, 1992).

Trabajos realizados en el marco del Proyecto FREPLATA (2005) identificaron cuatro categorías de potenciales amenazas a la biodiversidad en el Río de la Plata: especies invasoras, floraciones algales nocivas, alteración del ambiente físico y contaminación de aguas, sedimentos y biota. Como se verá a continuación, el dragado puede tener efecto sobre algunas de estas amenazas.

4.1 Impactos sobre la calidad del agua.

4.1.1 Cambios físicos.

Uno de los principales efectos del aumento de la concentración de sólidos suspendidos en la columna de agua es el aumento de la turbiedad. La turbiedad es una propiedad óptica de una masa de agua y expresa la atenuación de la luz, causada por su refracción y absorción, debido a materia orgánica e inorgánica en suspensión y sustancias disueltas (McCarthy, Pyle, & Griffin, 1974). El aumento de la turbiedad implica a su vez una mayor atenuación de la luz, lo cual reduce la visibilidad y la profundidad de la zona fótica.

Los sedimentos finos en suspensión producidos por las actividades de dragado son transportados por las corrientes y el oleaje cubriendo grandes áreas, reportándose en algunos estudios hasta 5 km² de extensión de la nube de sedimentos (Morton, 1977. Citado por Landaeta, 1995). Se ha identificado que, en ciertas condiciones, materiales finos pueden quedar en suspensión hasta dos años de finalizadas las actividades de dragado (Grigg, 1970. Citado por Johnston, 1981).

4.1.2 Cambios químicos.

Algunos de los parámetros que reflejan los cambios químicos sobre la calidad del agua, producto del dragado son: la demanda de oxígeno, el aumento de nutrientes, presencia de trazas de contaminantes (ej.: metales pesados y pesticidas) y la modificación de los niveles de salinidad (Landaeta, 1995).

Debido a que la resuspensión de sedimentos de fondo puede aumentar la demanda bioquímica de oxígeno, en algunos casos la concentración de oxígeno disuelto en las proximidades de

Resuspensión de sedimentos por una obra de dragado en el Río de la Plata.

Caso: Central de Ciclo Combinado (UTE), Punta del Tigre, San José.

actividades de dragado ha mostrado ser sensiblemente inferior en relación a zonas alejadas. Por otro lado, la reducción de la luz disponible para fotosíntesis puede provocar una reducción aún mayor del oxígeno disuelto (Brown & Clarck, 1968). En función de lo anterior, un aumento significativo de la turbiedad puede traer aparejado un aumento del dióxido de carbono en la columna de agua y como consecuencia una reducción del pH (EPA, 1976).

4.1.3 Suspensión y distribución de sedimentos contaminados.

Usualmente los sedimentos localizados en puertos y canales de navegación, ubicados en las cercanías de grandes ciudades, con complejos industriales o petroleros, altos volúmenes de tráfico comercial y/o descarga directa de aguas servidas, presentan altos niveles de contaminación. Los procesos de dragado tienen el potencial para poner en suspensión y distribuir estos sedimentos contaminados (Landaeta, 1995).

El dragado puede producir la liberación de compuestos tóxicos, como sulfuro de hidrógeno, metano, metales pesados, pesticidas, etc. Por ejemplo, cuando los sulfatos en el agua de mar se encuentran en una zona reductora (que puede ser generada en zonas de alto contenido de materia orgánica, alta demanda de oxígeno y poca circulación, por ejemplo, en sistemas de canales), estos se reducen a sulfuros, los cuales son altamente tóxicos y presentan una alta demanda química de oxígeno. Durante actividades de dragado, por ejemplo en el mantenimiento de canales, estos tóxicos son liberados en la columna de agua, generando mayor estrés sobre un ambiente posiblemente ya comprometido (EPA, 1976).

4.2 Impactos sobre fauna y flora.

Como se puede apreciar en el siguiente esquema, traducido de Nightingale & Simenstad (2001) (Figura 24), a pesar de que se enfoca solamente en la producción de peces y mariscos, las interacciones entre los aspectos ambientales del dragado y los organismos marinos, son numerosas y complejas. En este apartado se presenta una revisión de algunos de los principales impactos sobre la biota marina.

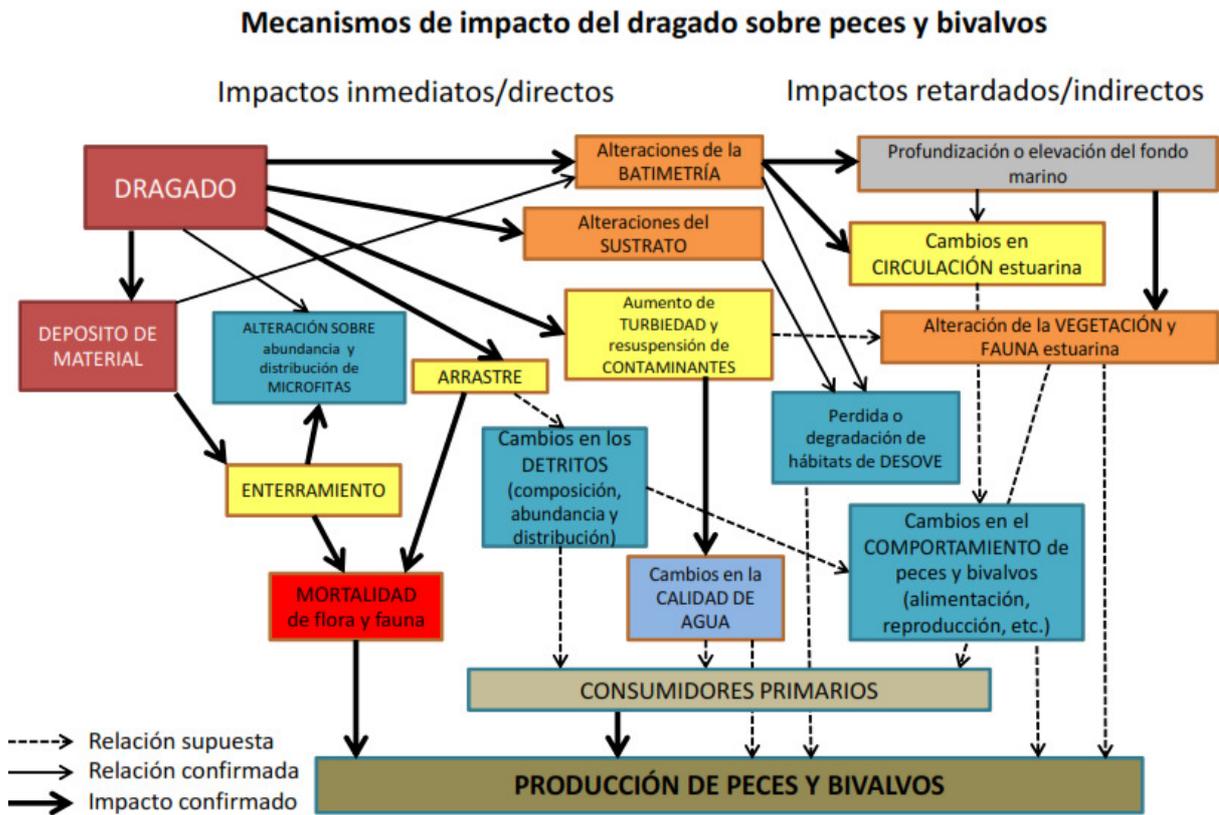


Figura 24: Mecanismos de potenciales impactos del dragado sobre la producción de peces y mariscos (Fuente: traducido de Nightingale & Simenstad, 2001).

4.2.1 Efectos del aumento de sólidos en suspensión.

El aumento de los sólidos en suspensión en la columna de agua y el consecuente aumento de la turbiedad, puede afectar de diversas formas a la biota marina. Como se mencionó anteriormente, el aumento de la turbiedad reduce la penetración de la luz en la columna de agua y, en consecuencia, se reduce la profundidad de la zona fótica. Esto tendría un impacto directo sobre la productividad primaria (Everhart and Duchrow, 1970, citado por Johnston, 1981). En algunos casos, la interferencia de la turbiedad sobre la fotosíntesis resulta en la destrucción del fitoplancton y las algas y por lo tanto en la destrucción de la base alimenticia de la biota marina (EPA, 1976).

La resuspensión de materiales del fondo también puede resultar en la liberación de nutrientes en la columna de agua, que podría beneficiar la productividad primaria, pero también puede liberar compuestos tóxicos presentes en los sedimentos. Las algas pueden asimilar tóxicos a una tasa relativamente rápida, comparada con otros organismos, y por lo tanto representan una importante entrada de tóxicos en la cadena alimenticia acuática. Ciertos contaminantes pueden directamente inhibir el crecimiento de algas (Krenkel and others, 1976. Citado por Johnston, 1981).

El forrajeo y la predación son procesos regulados por la calidad y cantidad de la luz subacuática, ya que las variaciones en la claridad del agua pueden determinar el balance entre predador y presa en un sistema y/o en un momento particular y modificar el comportamiento de los individuos, la interacción entre especies y las dinámicas entre comunidades (Steel & Neuhauser, 2002). Por ejemplo, la turbiedad puede ser un factor influyente en la distribución de los peces, que pueden verse afectados de diversas formas. Al reducirse la visibilidad, por un lado, dificulta su alimentación (Bouma, 1976. Citado por Johnston, 1981) y por otro lado, puede proteger a

especímenes juveniles de la depredación, influyendo así en su distribución (Cyrus & Blaber, 1987). Ante el aumento de los sólidos en suspensión, también puede producirse el agrupamiento, floculación y sedimentación de organismos planctónicos, reduciendo su población en la columna de agua (Simon and Dyer, 1972. Citado por Johnston, 1981).

Por otra parte, la acción mecánica o abrasiva de los sedimentos resulta nociva para los organismos que se alimentan por filtración (por ejemplo, almejas, esponjas, krill y algunas especies de peces y ballenas), debido al deterioro de las funciones respiratorias y excretorias y de la capacidad de alimentación (Sherk, 1971, citado por Johnston 1981). Se ha observado la reducción del crecimiento de otras, ante altos niveles de sólidos suspendidos, debido a la reducción de las tasas de bombeo³. En este tipo de organismos el bombeo permite la respiración y nutrición, por lo que una prolongada reducción de la capacidad de bombeo puede traducirse en estrés metabólico (EPA, 1976). Se ha constatado que altas turbideces y sedimentación actúan disminuyendo la abundancia de los corales, alterando sus formas de crecimiento y reduciendo la diversidad de especies coralinas (Dodge & Vaisnys, 1977).

Concentraciones muy altas de material suspendido pueden sofocar a los peces, obstruyendo las branquias. Estudios realizados en peces en zonas de dragado activo, han mostrado reducciones en su actividad general de nado, modificaciones en patrones de dominancia social y se observaron comportamientos de "tos" y raspado de agallas en peces, intentando eliminar el exceso de material particulado acumulado (EPA, 1976). Las partículas más gruesas pueden causar abrasión en la piel de los peces, eliminando la mucosa protectora, reduciendo como consecuencia su protección ante parásitos o enfermedades (Everhart and Duchrow, 1970. Citado por Johnston, 1981).

Como se mencionó anteriormente, la resuspensión de sedimentos puede producir descensos en la concentración de oxígeno disuelto, lo cual puede resultar crítico para la biota marina, especialmente en los meses cálidos, donde el nivel de oxígeno ya puede ser relativamente bajo, debido a las altas temperaturas (Sherk, 1971. Citado por Johnston 1981). El estrés resultante de bajas concentraciones de oxígeno puede provocar desde la reducción de la abundancia de algunas especies, hasta episodios de mortalidad masiva (Trent, 1976).

4.2.2 Efectos de la extracción y depósito de sedimentos.

La extracción de sedimentos del fondo marino provoca una afectación directa sobre la fauna allí presente, tanto la que habita sobre el lecho, como la que lo hace dentro del lecho, debido a que junto con los sedimentos se produce la remoción de los organismos que se encuentren en el área de dragado.

Por otra parte, los efectos de la sedimentación del material dragado pueden tener consecuencias negativas sobre la biota del lecho marino. Como efecto inmediato, pueden provocar la sofocación de la biota del fondo, reduciendo tanto el número de especímenes como de especies (Klapan, E. H.; Welker, J. R.; Kraus & McCourt, S., 1975). Bajo condiciones prolongadas de sedimentación puede provocarse la pérdida total de las especies en el área afectada (Sherk, 1971. Citado por Johnston, 1981). También se observan efectos negativos sobre especies de peces, ya que modifica los hábitats, afectando la disponibilidad de alimento y las áreas de desove o directamente asfixiando huevos y larvas (EPA, 1976).

Donde se ha realizado la extracción sostenida de arenas y gravas mediante dragado, se han producido alteraciones significativas de la granulometría del lecho marino y, por lo tanto, de los ecosistemas del fondo, afectando tanto la riqueza como la abundancia de las especies

³ "Volumen de agua que fluye a través de las branquias por unidad de tiempo" (Winter, 1978. Fundamental knowledge of suspension-feeding in lamellibranchiate bivalves, with special reference to artificial aquaculture systems. Citado por Madrigal, 1985).

existentes. Pequeñas variaciones en granulometría de los sedimentos puede impactar significativamente a las comunidades bentónicas (Desprez, 2000).

Mientras que la epifauna móvil podría adaptarse a pequeños cambios en la estructura vertical de los sedimentos del fondo, la epifauna fija, como ostras, percebes y corales, se ve seriamente afectada, e incluso destruida totalmente, cuando es cubierta de sedimentos (Sherk, 1971. Citado por Johnston, 1981).

Según Herbich (1992) otros posibles impactos negativos están asociados a la migración de peces por causa del dragado y la interferencia con procesos migratorios de algunas especies.

4.3 Cambios físicos del fondo marino.

El dragado causa una redistribución de sedimentos que puede resultar en una modificación de la topografía del fondo marino y alterar los patrones de circulación (EPA, 1976), así como también modificar la granulometría de los sedimentos del fondo (Desprez, 2000). A su vez, el dragado de canales puede resultar en el enlentecimiento de las corrientes y por lo tanto favorecer la sedimentación de partículas más finas (Klapan, E. H.; Welker, J. R.; Kraus & McCourt, S., 1975). Tanto el dragado como el depósito de materiales pueden afectar los canales naturales. Los mismos pueden sufrir cambios morfológicos, como cambios de la sección transversal, cambios en las pendientes longitudinales y formación y consolidación de barras (Landaeta, 1995).

Los cambios en los sedimentos y la dinámica de las corrientes, causados por obras de dragado en estuarios, pueden alterar a su vez los regímenes químicos naturales, así como algunas características físicas de los mismos. Algunos de los efectos identificados debido a la presencia de canales profundos son: aceleración de la salida de agua dulce de los estuarios ("runoff"), depresión de acuíferos de agua dulce, distorsión de las entradas de nutrientes a las cadenas tróficas, reducción del efecto de buffer hidráulico de las "llanuras de marea" y creación de sumideros de nutrientes y áreas con aguas salinas densas (EPA, 1975).

La construcción de nuevos canales o la modificación de canales existentes, pueden provocar un menor ingreso de agua dulce a un estuario, lo que genera un corrimiento de la intrusión salina. Así puede verse reducida o incluso eliminada la zona de mezcla, la cual cumple un rol importante como área de desarrollo de parte de la fauna marina. A su vez los canales o depósitos de sedimentos pueden generar zonas de baja mezcla y por lo tanto de baja aireación, cuando ésta es provocada fundamentalmente por acción del viento. En dichas zonas las condiciones físicas y químicas del fondo pueden limitar severamente la diversidad y abundancia de organismos bentónicos (EPA, 1975).

5 Dragado y resuspensión de sedimentos.

En este capítulo se presenta una revisión de los diferentes métodos de dragado, transporte y disposición de sedimentos y los mecanismos que provocan la resuspensión de los sedimentos en la columna de agua y su desarrollo en el cuerpo receptor, así como algunos elementos de predicción.

Las principales fuentes de información utilizadas fueron las publicaciones “Dredging for Development” (IADC-IAPH, 2010) y “Technical Guidelines for Environmental Dredging of Contaminated Sediments” (Palermo et al, 2008).

5.1 Equipos y métodos de dragado, transporte y disposición de sedimentos.

En forma resumida, el dragado es la excavación subacuática de suelos y rocas. Los motivos básicos por los que se draga son:

- Navegación: creación, ampliación y mantenimiento de puertos, dársenas, canales, etc.
- Construcción: proporcionar materiales de construcción como arena, grava y arcilla; o como rellenos para creación de nuevas tierras ganadas al mar.
- Regeneración de playas: proporcionar material de relleno para la protección y recomposición de playas.
- Recuperación ambiental: remediación o eliminación de contaminantes subacuáticos.
- Prevención de inundaciones: mejora o mantenimiento de descargas fluviales.
- Minería: extracción de minerales, piedras y metales preciosos, o la eliminación de materiales suprayacentes para acceder a los mismos.

Otros motivos incluyen la excavación para el emplazamiento de tuberías o cimentaciones subacuáticas, el control de inundaciones en áreas pantanosas o zonas de tierras bajas, y el mantenimiento de canales y reservas para riego.

En el proceso de dragado se reconocen cuatro fases:

- Excavación
- Transporte vertical
- Transporte horizontal
- Disposición o uso del material dragado.

Si bien la actividad principal es la excavación, el transporte y la disposición del material requieren el mismo grado de consideración desde el punto de vista ambiental, a la hora del diseño, construcción y mantenimiento de proyectos de dragado, particularmente en lo relacionado con el aumento de los sedimentos en suspensión.

5.1.1 Tipos de dragas.

El tipo de draga a utilizar en un proyecto depende de varios factores y su selección y el modo de operación, depende de detalles específicos de cada proyecto. Algunos de los principales factores que influyen en la elección de la draga son: la cantidad y naturaleza del material a dragar, las opciones de disposición, la disponibilidad de equipos y/o costo de movilización y la precisión necesaria.

Resuspensión de sedimentos por una obra de dragado en el Río de la Plata.

Caso: Central de Ciclo Combinado (UTE), Punta del Tigre, San José.

Existen muchas formas de describir los distintos tipos de dragas, pero básicamente se separan en los siguientes cuatro grupos, dependiendo de la forma de excavar y de su funcionamiento:

- Dragas mecánicas
- Dragas hidráulicas
- Dragas hidráulicas-mecánicas (utilizan la combinación de ambos elementos)
- Dragas hidrodinámicas.

Dentro de estas cuatro categorías se pueden establecer subdivisiones, basadas en el sistema de propulsión, ya sean autopropulsadas (durante la fase de excavación, la de transporte, o ambas) o estacionarias.

5.1.1.1 Dragas mecánicas.

Esta categoría utiliza medios mecánicos para la excavación del material y en general los equipos son similares a los que se utilizan para excavaciones en tierra. A continuación, se presentan los ejemplos más comunes de dragas mecánicas.

5.1.1.1.1 Dragas de cuchara o tipo “clamshell”.

Este tipo de draga tiene un equipo fijo o giratorio, montado sobre un pontón flotante. El equipo dispone de sistemas de elevación y utiliza un dispositivo de extracción o cuchara, generalmente tipo “clamshell” (por “almeja” en inglés), para excavar el material del fondo y elevarlo verticalmente. Se pueden utilizar las dragas de cuchara para excavar arenas, algunos tipos de arcilla, gravilla, gravas y eventualmente piedras más grandes. No son demasiado eficaces cuando se trata de sedimento muy fino, porque tiende a escaparse de la cuchara, no obstante, se utilizan para este fin en proyectos pequeños, o cuando se les instala cucharas con cierres herméticos especiales.



Figura 25: Draga de cuchara tipo “clamshell” utilizada en la obra de Punta del Tigre.

Resuspensión de sedimentos por una obra de dragado en el Río de la Plata.

Caso: Central de Ciclo Combinado (UTE), Punta del Tigre, San José.

Una de las ventajas de la draga de cuchara es que se pueden emplear en aguas relativamente profundas y para llevar a cabo dragados en puntos muy concretos, por ejemplo, junto a muelles. Dependiendo del tipo de material excavado, tienen un rendimiento de producción moderado o bajo. En general son estacionarias y se fijan en la zona de excavación mediante anclas o “spuds”.

La draga principal finalmente utilizada en la obra de Punta del Tigre fue de este tipo (ver Figura 25), con una cuchara de 10 m³, apoyada por barcasas y remolcadores. En la zona de playa también se utilizaron retroexcavadoras para realizar la excavación de acceso a la estación de bombeo.

5.1.1.1.2 Dragas retroexcavadoras.

Las dragas retroexcavadoras son iguales a las excavadoras terrestres, con un tacho de excavación montado sobre un brazo articulado, normalmente montadas en pontones. El material se extrae, se eleva a la superficie y se coloca en barcasas para su transporte. Su rendimiento de producción suele ser moderado.

Pueden excavar una gran variedad de materiales, como arena, arcilla, gravilla y piedras más grandes, e incluso roca relativamente dura, fracturada o no. Su radio de operación y alcance de profundidad son limitados. Generalmente estas dragas son estacionarias y requieren “spuds”, o en algunos casos anclas, para fijarlas en el lugar del dragado.

5.1.1.1.3 Dragas de pala (tipo “dipper”).

Estas dragas constan de una cabina giratoria, un brazo basculante y la pala con tacho, montados sobre una barcaza. Normalmente utilizan un sistema de fijación de patas o “spuds”.

Estas dragas son especialmente indicadas para dragar roca dura y materiales altamente compactos, pero presentan limitaciones respecto a la profundidad en que son capaces de dragar.



Figura 26: Draga de pala tipo “dipper” (Fuente: Dredging for Development, 2010)

5.1.1.1.4 Dragas de cangilones.

Las dragas de cangilones utilizan una serie de tachos o cangilones montados en una cadena sinfín. Los cangilones se mueven de tal manera que excavan los materiales del fondo, en la posición más baja de la cadena y luego son elevados a la parte más alta, donde acaban volcando su contenido en una tolva, que los vierte sobre las barcasas para su posterior transporte.

Resuspensión de sedimentos por una obra de dragado en el Río de la Plata.

Caso: Central de Ciclo Combinado (UTE), Punta del Tigre, San José.

Las dragas de cangilones se pueden utilizar de manera eficaz en una gran variedad de materiales, que podría incluir hasta roca blanda. En algunos casos, estas dragas son autopropulsadas para su transporte hasta el lugar de dragado.

5.1.1.2 Dragas hidráulicas.

Estas dragas utilizan bombas centrífugas hidráulicas que les proveen la fuerza de excavación, sin elementos de corte mecánicos. Normalmente el transporte del material también es hidráulico, a través de tuberías, hasta el lugar de descarga.

5.1.1.2.1 Dragas estacionarias de succión.

Estas dragas pueden trabajar a gran profundidad, utilizando bombas centrífugas e inyectores de agua para fluidificar el material a dragar. Pueden ser estacionarias o autopropulsadas, aunque la autopropulsión no se utiliza durante el proceso de excavación. Son eficaces con materiales no consolidados como arena y gravilla. Son incapaces de operar con materiales consolidados, pero con un material adecuado tienen un alto rendimiento de producción.

5.1.1.2.2 Dragas “dustpan”.

Son un tipo de draga de succión, utilizadas con eficacia en ríos con aguas que contienen altas cantidades de material en el fondo o concentraciones de sólidos en suspensión como arena y gravilla y que, en determinadas condiciones, forman barreras u obstrucciones en los canales de navegación. Las dragas tipo “dustpan” (así llamadas por su funcionamiento similar a una aspiradora) son capaces de mover altos volúmenes de material desde zonas localizadas, utilizando un cabezal de aspiración (Figura 27), el cual consta de inyectores de agua para fluidificar el material a dragar. Estas dragas fueron diseñadas para su uso en grandes sistemas de navegación fluvial.



Figura 27: Cabezal de una draga “dustpan” (Fuente: <http://www.graduadosportuaria.com.ar>).

5.1.1.3 Dragas hidráulicas-mecánicas.

Entre las dragas mecánicas-hidráulicas se encuentran las dragas de succión con cabezal cortador o de rueda de cangilones y las dragas de succión en marcha. Son los equipos mayormente utilizados para grandes proyectos de construcción y mantenimiento de canales.

5.1.1.3.1 Dragas con cabezal cortador y de rueda de cangilones.

Tanto la draga con cabezal cortador (“cutterhead”) o de rueda de cangilones, utilizan dispositivos mecánicos, llamados “cortadores”, montados delante de la boca de succión. Los cortadores excavan el material y lo rompen para que tenga el tamaño adecuado. Luego, se aspira el material a través de un tubo de succión y se bombea hacia la superficie. Estas dragas pueden operar de manera eficaz a profundidades de hasta aproximadamente 35 metros. Se caracterizan por un alto rendimiento de producción y la capacidad de dragar limos, arcillas, arena, gravas, piedras más grandes y roca fracturada de manera eficaz.

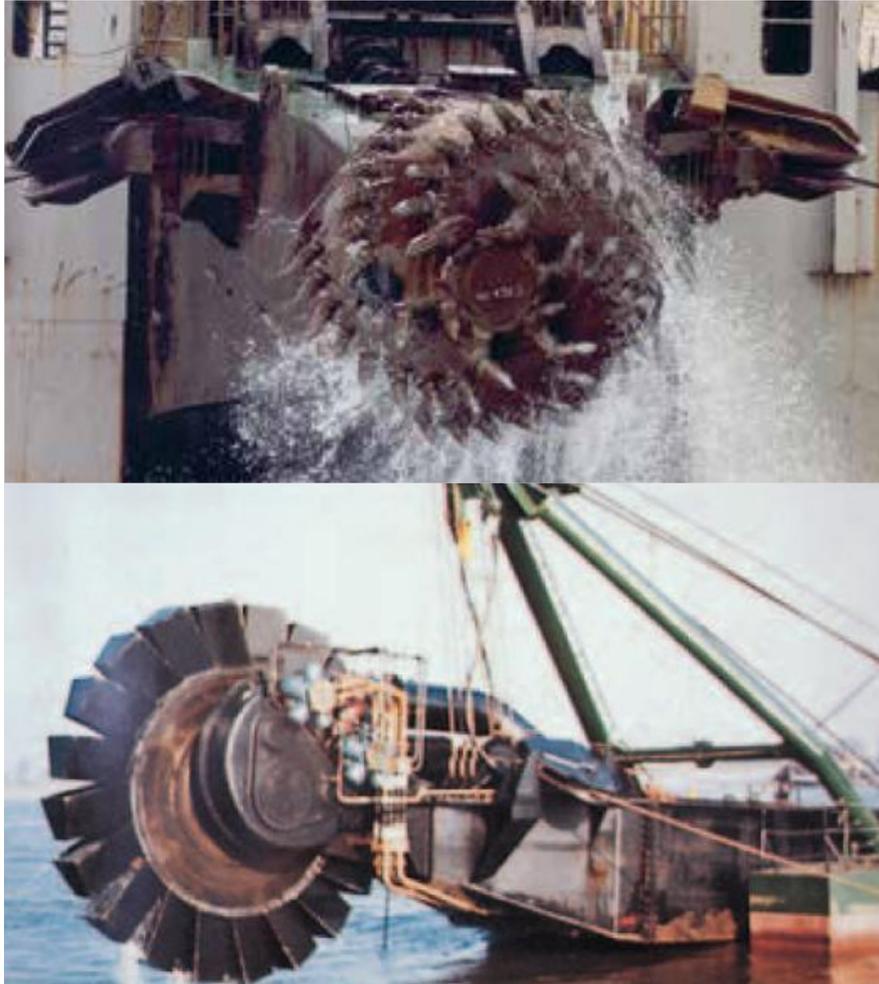


Figura 28: Arriba: Cabezal cortador. Abajo: Cabezal de rueda de cangilones (Fuente: IADC-IAPH, 2010).

Funcionan en modo estacionario con “spuds” o anclas. Algunas son autopropulsadas para su propio transporte hasta el lugar de trabajo. Tienen alternativas flexibles de descarga y pueden hacerlo en barcazas o mediante tubos de descarga al lugar de depósito.

Los cabezales cortadores rotan sobre el eje del tubo de succión, mientras que las dragas de rueda de cangilones rotan perpendicularmente al eje del tubo de succión. La rueda de cangilones se utiliza principalmente en aplicaciones mineras.

5.1.1.3.2 Dragas de succión en marcha o “TSHD”.

Las dragas de succión en marcha o TSHD (por su nombre en inglés “*Trailing Suction Hopper Dredge*”) son barcos autopropulsados que dragan, succionando el material, mientras navegan a bajas velocidades.

Resuspensión de sedimentos por una obra de dragado en el Río de la Plata.

Caso: Central de Ciclo Combinado (UTE), Punta del Tigre, San José.

Estas dragas cuentan con brazos de succión articulados, para alcanzar el fondo del mar con el cabezal de arrastre. Los cabezales pueden contar con sistemas de dientes cortadores y/o inyectores de agua a presión, para excavar el material y ayudar a formar la mezcla que posteriormente se succiona a través de los brazos.

Por la acción de bombas centrífugas el material es elevado a la superficie y se descarga en las tolvas o cántaras que estas dragas tienen incorporadas en su propio casco, donde los sólidos se sedimentan y se almacenan para su transporte y posterior disposición. El material se descarga a través de compuertas o válvulas en el fondo de la tolva o se puede bombear desde las tolvas a través de las tuberías de descarga, hacia sitios de depósito en tierra.



Figura 29: Arriba: vista general de una draga de succión en marcha. Abajo izq.: vista de la cántara. Abajo der.: cabezal de succión (Fuentes: <http://www.dh-dredging.hegemann-gruppe.de/en/index.php>, <https://dredgwire.com/newly-built-tshd-doing-the-portuguese-proud/>).

Estas dragas son bastante flexibles en lo que se refiere al material que pueden dragar, alternativas de disposición y su capacidad de trabajar tanto en aguas protegidas como en mar abierto. Son eficaces en limos, arenas, arcillas y gravas. Tienen un rendimiento de producción relativamente alto y los equipos más grandes pueden excavar de manera eficaz a profundidades de hasta 60 metros.

5.1.1.4 Dragas “hidrodinámicas”.

Las dragas hidrodinámicas refieren más al método de transporte del material movilizado, que a un tipo de equipo específico. En estos casos se moviliza el material debajo del agua (puede ser de forma mecánica o hidráulica) y la masa de sedimentos se transporta muy cerca del fondo, desde el lugar de excavación, debido a: corrientes inducidas por el gradiente de densidad entre la masa y el agua, corrientes naturales de la zona de dragado y las pendientes del fondo.

Esta es una técnica de dragado relativamente barata cuyo uso está limitado a limos, arcilla no consolidada y arenas finas. El sistema puede montarse sobre una barcaza autopropulsada o estacionaria, o bien puede ser una estructura fija en un muelle que suele tener sedimentaciones.

5.1.2 Transporte del material dragado.

Luego que los sedimentos son extraídos del área de dragado, deben ser transportados al sitio de depósito. El transporte de material extraído es parte integral del proceso de dragado y su modo lo determina en gran medida el tipo de equipo utilizado y las opciones disponibles de disposición.

Las dragas de succión hidráulicas y con cortador, suelen utilizar tuberías para transportar el material extraído, hacia el lugar de depósito. Cuando resulta necesario, debido a la distancia al sitio de disposición, se utilizan estaciones de bombeo en puntos de la línea de descarga. Estas tuberías pueden ser flotantes, montadas en pontones o sumergidas. Las dragas mecánicas suelen utilizar barcasas para transportar el material. En estos casos, a no ser que la barcaza sea autopropulsada, se utilizan barcos auxiliares como remolcadores, para remolcar o empujar las embarcaciones de transporte. En el caso de las dragas de succión en marcha (TSHD), el material es transportado por la misma draga, que cuenta con una cántara central para la acumulación y transporte de los sedimentos.

En particular, en la obra de Punta del Tigre, la draga contó con el apoyo de barcasas y remolcadores para el transporte de los sedimentos, hasta el área destinada al acopio transitorio. Para la tapada de las tuberías, además de las barcasas, se utilizó transporte por una tubería flotante, mediante el bombeo de los sedimentos desde el área de acopio.

5.1.3 Disposición del material dragado.

La última etapa del proceso de dragado, si el material no es reutilizado, es el depósito del mismo. Los principales factores que influyen en la elección de las opciones de depósito son: la accesibilidad desde la obra, el tipo de draga y sistema de transporte empleados, la presencia de contaminantes en los sedimentos, los costos y factores ambientales.

En general se busca que el material dragado sea utilizado para fines beneficiosos. Estos pueden ser la creación de nuevas tierras mediante relleno, su utilización como árido para construcción, creación de hábitats de vida silvestre, construcción de elementos de protección de costas, regeneración de playas, relleno de minas o excavaciones abandonadas, etc.

Si no es posible utilizar el material dragado, ya sea por su naturaleza, volumen, o porque está contaminado, se debe depositar en un sitio adecuado y de forma que produzca el mínimo daño ambiental posible. Según Nightingale & Simenstad (2001) normalmente los sitios de depósito de material dragado se dividen en tres categorías:

- en aguas abiertas - no confinados
- en aguas abiertas - confinados
- en tierra - confinados

La calidad de los sedimentos, en particular la presencia de contaminantes nocivos para el medio ambiente y/o para la salud humana, puede determinar el método de disposición más adecuado. A continuación, se describen brevemente algunas de las técnicas más comunes de disposición de sedimentos o formas de aprovechamiento.

5.1.3.1 Depósito no confinado en aguas abiertas.

En aguas abiertas, el potencial impacto dependerá en gran medida del comportamiento físico de la descarga. Dicho comportamiento estará asociado al método de dragado y de descarga utilizados, a las características físicas del material y a la hidrodinámica del área de depósito.

La disposición del material en aguas abiertas puede ejecutarse a través de tuberías, disposición mecánica directa, mediante la descarga desde las mismas dragas (como es el caso de las TSHD) o con la utilización de barcazas. El depósito en aguas abiertas puede ser confinado o no, dependiendo de la calidad de los sedimentos y de los objetivos de cada proyecto.

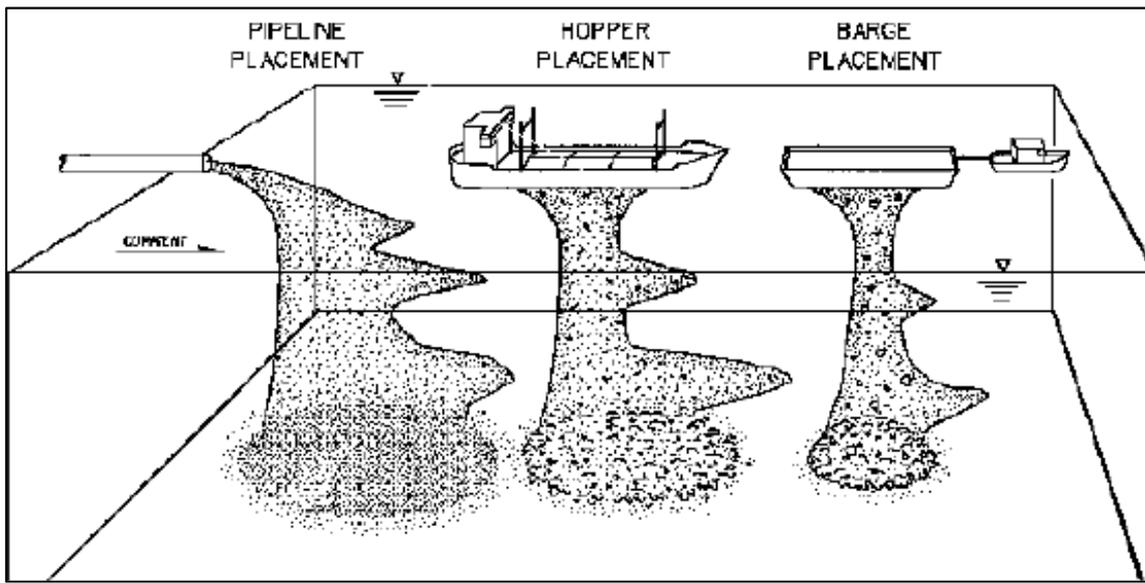


Figura 30: Técnicas de disposición en aguas abiertas (Fuente: USEPA/USACE 2004)

Los depósitos no confinados en aguas abiertas pueden ser dispersivos o no dispersivos. En los no dispersivos la intención es que el material permanezca en el fondo, mientras que en los dispersivos el material es dispersado durante la disposición o arrastrado posteriormente del fondo por efecto de las corrientes y el oleaje.

5.1.3.2 Depósito confinado en aguas abiertas.

Cuando los sedimentos contienen contaminantes que representan un potencial riesgo de efecto nocivo para el medio ambiente y/o para la salud humana, no es adecuada la opción de disposición de forma no confinada. Los sitios de depósito confinados son estructuras diseñadas para la contención del material dragado. Los diques o estructuras de confinamiento sobresalen de la superficie del agua, aislando el material dragado del cuerpo de agua adyacente.

5.1.3.3 Recubrimiento (“capping”).

Se denomina recubrimiento o “capping” a la disposición controlada de sedimentos limpios, conformando una capa sobre sedimentos contaminados presentes en un sitio. Estas capas pueden ser construidas con material granular, normalmente gravas y arenas, o pueden tener un diseño más complejo, incluyendo geotextiles, membranas, carbón orgánico, etc. Dependiendo de los contaminantes y del medio, la capa es diseñada para reducir el riesgo a través de tres funciones principales:

- Aislamiento físico, para reducir la exposición por contacto directo y minimizar la acción de organismos excavadores que pueden transportar los contaminantes a la superficie del fondo.

Resuspensión de sedimentos por una obra de dragado en el Río de la Plata.

Caso: Central de Ciclo Combinado (UTE), Punta del Tigre, San José.

- Aislamiento químico, para reducir la exposición a contaminantes disueltos transportados a la columna de agua.
- Estabilización y protección contra la erosión de la masa de sedimentos contaminados para evitar la resuspensión y transporte a otros sitios.

5.1.3.4 Aprovechamiento del material dragado.

Existen numerosos usos potenciales para los materiales dragados, entre los cuales se destacan los siguientes:

- Estabilización de costas y control de erosión
- Restauración o mejoramiento de hábitats
- Aporte para mantenimiento de playas
- Recuperación de minas a cielo abierto
- Material de cobertura para rellenos sanitarios
- “Capping” de sedimentos contaminados
- Áridos para construcción

A medida que los costos de los materiales y las restricciones para su disposición se incrementan, estos usos alternativos resultan cada vez más atractivos para los proyectos de dragado. Además, se reduce el uso de sitios de depósito, de capacidad limitada, y se pueden reducir costos de movilización y las distancias de transporte del material.

5.2 Resuspensión de sedimentos.

Todas las actividades de dragado resuspenden sedimentos en mayor o menor medida. La resuspensión refiere a la extracción del fondo y posterior dispersión de sedimentos en la columna de agua, provocada fundamentalmente por los sedimentos más finos, que son dispersados y transportados por las corrientes.

La siguiente figura muestra una representación de la pluma de sedimentos generada por una draga tipo TSHD, generada por el cabezal de la draga y normalmente también debido a la práctica de rebose u “overflow”.

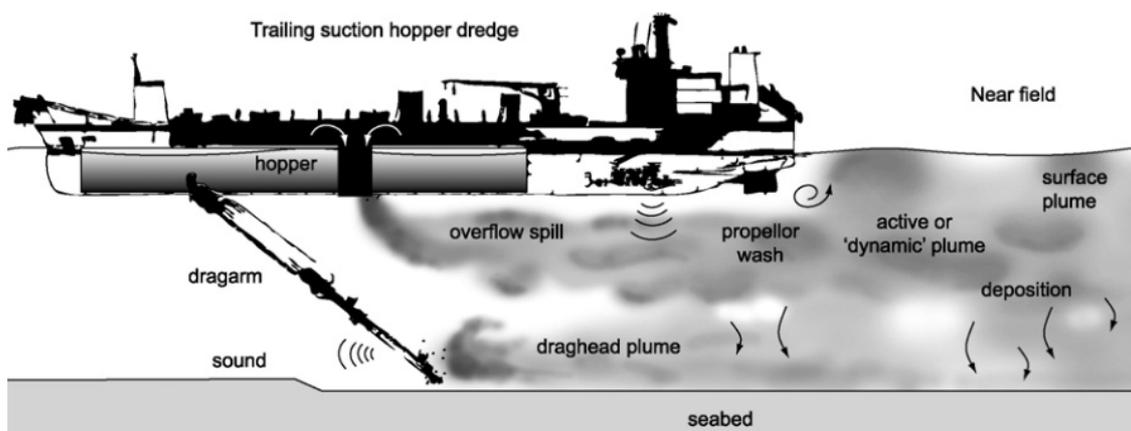


Figura 31: Representación de la pluma generada por una draga tipo TSHD (Fuente: Jones, 2016).

La resuspensión de sedimentos puede traer aparejada la liberación de contaminantes en la columna de agua, liberados en el agua de los poros del lecho o adsorbidos en las partículas de

Resuspensión de sedimentos por una obra de dragado en el Río de la Plata.

Caso: Central de Ciclo Combinado (UTE), Punta del Tigre, San José.

sedimentos, por lo que el control de la resuspensión también permite minimizar la liberación de contaminantes.

Según Palermo (2008) la mayoría de los sedimentos resuspendidos sedimentan cerca del área de dragado en un lapso de una hora y solo una fracción menor (las partículas más finas y flocs) permanece más tiempo en la columna de agua. Sin embargo, estas fracciones pueden presentar velocidades de sedimentación muy bajas y por lo tanto permanecer suspendidas durante horas o días.

Para poder entender el potencial de las actividades de dragado de resuspender sedimentos en la columna de agua, es necesario poseer un conocimiento básico tanto de las variables que controlan la resuspensión de sedimentos, como de los denominados *factores de resuspensión*.

La resuspensión de sedimentos durante el dragado es inevitable, pero la intensidad del efecto es muy variable, dependiendo de numerosos factores, desde características propias del sitio hasta variables operativas. Según Pennekamp et al. (1996) estos factores se pueden resumir como la combinación de los siguientes principales factores:

- Las características de las operaciones de dragado: tipo y tamaño de las dragas, la técnica específica con que se ejecuta la excavación, forma de transporte vertical y horizontal de sedimentos, las tasas de producción, etc.
- La naturaleza de los sedimentos del lecho: la facilidad con que el sedimento de fondo se resuspende dependerá básicamente de la naturaleza geotécnica, reológica e incluso microbiológica de los sedimentos (distribución granulométrica, contenido de agua, densidad, gravedad específica, contenido orgánico, etc.).
- Las condiciones del cuerpo receptor: características de las corrientes, las mareas y el oleaje, la profundidad y forma del fondo, la salinidad y estratificación y la presencia de estructuras (muelles, escolleras, puentes, etc.).

En un informe realizado por el grupo Anchor Environmental (Anchor Environmental CA, 2003, elaborado para *Los Angeles Contaminated Sediments Task Force*, de Los Angeles, California), en base a numerosos estudios de campo de resuspensión de sedimentos, realizados en un amplio rango de condiciones, se concluye que (en la mayoría de los casos) el comportamiento de la concentración de sedimentos suspendidos responde a los siguientes patrones:

- Es mayor cerca del fondo, en comparación con el resto de la columna de agua
- Decece rápidamente con la distancia a al lugar de dragado
- Es mayor para menores tamaños de partículas
- Es mayor en ambientes con corrientes capaces de movilizar los sedimentos perturbados por el dragado.

Estos estudios también han mostrado que el tamaño y forma de las plumas de sedimentos están determinados, fundamentalmente, por la hidrodinámica del cuerpo receptor. Por lo tanto, las corrientes son un factor importante, tanto en la cantidad de material resuspendido, como en el área de afectación.

Dependiendo del proyecto, una evaluación previa de la resuspensión potencial podría ser necesaria, para comparar los resultados con estándares de desempeño de resuspensión de sedimentos o con estándares de calidad de agua, para establecer la necesidad de aplicar medidas de control y su diseño (restricciones en tasas o tiempos de operación, colocación de barreras para sedimentos, etc.) y el diseño de los planes de monitoreo correspondientes.

Existen numerosos trabajos de campo de medición de sedimentos resuspendidos, y aunque esos datos empíricos tienen poco valor predictivo por sí solos, son la base de los modelos de predicción. Los métodos utilizados para dicha estimación se basan en la información referente a las tasas de producción, características de los sedimentos y tipo y tamaño de las dragas. Con

dicha información se determina la masa de sedimentos que podrían resuspenderse por unidad de tiempo en la columna de agua. Esto puede acoplarse a modelos hidrodinámicos y de transporte de sedimentos, para predecir valores de concentración de sólidos suspendidos, en función del tiempo y la distancia al punto de generación. Una estimación adecuada de las tasas de producción de sedimentos parece ser un paso crucial en el proceso de modelación.

5.2.1 Factores de Resuspensión.

Los factores de resuspensión representan el porcentaje de sólidos removidos del fondo marino que se liberan a la columna de agua en cada ciclo de operación de una draga. A modo de ejemplo, según el *Liquified Natural Gas Precinct Strategic Assessment Report* (Government of Western Australia, 2010), la tasa de liberación de material a la columna de agua para una draga retroexcavadora, varía entre el 8 y el 10 % del material que la pala levanta en cada ciclo. Por otro lado, según Anchor Environmental (2003) el promedio para dragas hidráulicas-mecánicas es de 0,77 %, mientras que para las dragas mecánicas es de 2,1 % (ver Figura 32). A este porcentaje se le denomina *factor de resuspensión*.

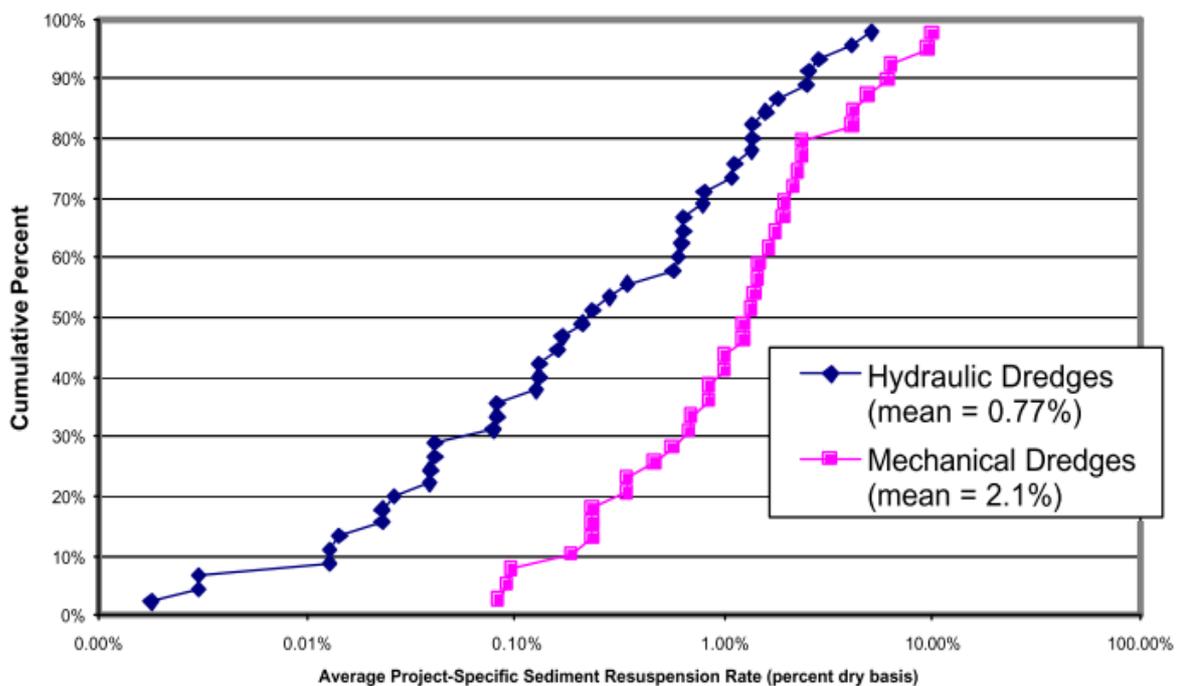


Figura 32: Distribución de los factores de resuspensión para dragas hidráulicas y mecánicas (Fuente: Anchor Environmental, 2003).

Más específicamente Hayes & Wu (2001) definen el *factor de resuspensión* como la fracción de material de granulometría fina en los sedimentos, que es dispersado en la columna de agua. Es importante notar que podría existir una diferencia significativa entre las definiciones antes mencionadas. Muchas veces las mediciones para determinar los factores de resuspensión se realizan próximas al sitio de dragado y por lo tanto incluyen la fracción gruesa de los sedimentos, lo cual estaría acorde con la primera definición. Por otro lado, según Hayes & Wu (2001) el factor de resuspensión solo incluiría la fracción fina y por lo tanto las mediciones deberían realizarse en áreas suficientemente alejadas de sitio de dragado, donde solamente se encuentra en suspensión dicha fracción.

Resuspensión de sedimentos por una obra de dragado en el Río de la Plata.

Caso: Central de Ciclo Combinado (UTE), Punta del Tigre, San José.

En la Tabla 1 se presentan algunos valores de *factores de resuspensión*, recopilados de la bibliografía consultada, en función del tipo de draga. Estos datos normalmente provienen de dos fuentes:

- Mediciones de campo en operaciones de dragado específicas, usadas para establecer una relación entre la liberación (o pérdida) de sedimentos con las tasas de producción del dragado, o
- Conocimiento general de los procesos de dragado, centrándose en la información y experiencia existente, con base en literatura científica.

Tabla 1: Factores de resuspensión de sedimentos, en %, para distintos tipos de dragas.

Tipo de draga	Porcentaje de sedimentos liberados a la columna de agua
De succión en marcha (TSHD)	1 (sin "overflow"*) (Government of Western Australia, 2010) 32 (con "overflow") (Government of Western Australia, 2010) 0.1 - 2.2 (Pennekamp et al., 1996) 0.3 - 9.8 (Kemps & Masini, 2017)
Retroexcavadora	8 – 10 (Government of Western Australia, 2010)
Tipo "cutterhead"	0.08 - 12.8 (Kemps & Masini, 2017) 0.003 - 0.13 (D. Hayes & Wu, 2001)
De cuchara ("clamshell")	0.38 - 1.12 (Hayes, 2007) 0.16 – 0.88 (D. Hayes & Wu, 2001) 0.3 – 1.9 (Pennekamp et al., 1996) 1.5 – 3 (Bohlen, Cundy, & Tramontano, 1979)
De pala	2.1 – 5.4 (Pennekamp et al., 1996)
De cangilones	0.3 – 2.1 (Pennekamp et al., 1996)

*"Overflow" o rebose, refiere a la práctica comúnmente utilizada para eliminar el exceso de agua de la cántara o barcaza y maximizar el transporte de sedimentos (ver Figura 31).

En base a la bibliografía consultada y los datos recopilados, se observa que la selección del tipo de draga y, más aún, el tipo de operación a utilizar (sobre todo la práctica de rebose) pueden influir significativamente en los niveles de turbiedad generados, pero también existen otros factores, como las características de los sedimentos y del cuerpo receptor, que pueden tener aún un mayor impacto. A la hora de seleccionar el equipo y la técnica a utilizar, si se busca minimizar el efecto de resuspensión, el desafío parece estar en escoger los que sean más adecuados para las características específicas del sitio donde se realizará la actividad.

Hayes & Wu (2001) plantean algunos elementos que podrían explicar las variaciones en los factores de resuspensión para cada tipo de draga. Por ejemplo, mencionan que el tamaño puede ser importante para las dragas tipo "cutterhead", debido al aumento de la intensidad de la succión con el tamaño de los equipos. Por otro lado, plantean que el factor de resuspensión para dragas tipo "clamshell" aumentaría en función de la profundidad del cuerpo de agua.

Además de los factores de resuspensión, que buscan estimar la masa del material dragado que se pierde en la columna de agua, cuando el foco está en proteger el ambiente receptor, suele

ser de mayor interés estimar la concentración de sólidos suspendidos en las proximidades de una draga en operación, en comparación con el al valor de fondo. En el citado trabajo de Anchor Environmental (2003) se resumen los resultados de numerosos trabajos donde se realizaron mediciones de SST y determinaciones de los factores de resuspensión. A su vez, el documento "Estimating contaminant losses from components of remediation alternatives for contaminated sediments" (EPA, 1996), contiene un resumen de observaciones sobre resuspensión de sedimentos y concentración de SST, para varios tipos de dragas, con distintas condiciones operativas y a distintas distancias desde el punto de dragado. Todas estas observaciones pueden ser de interés, tanto para la estimación de los factores de resuspensión, como para verificar la consistencia de las predicciones de resuspensión de sedimentos.

5.2.2 Modelos de predicción.

La guía "Technical Guidelines for Environmental Dredging of Contaminated Sediments" (Palermo, 2008) incluye una recopilación de algunos de los modelos matemáticos que han sido utilizados para estimar la resuspensión y el transporte de sedimentos provocados por obras de dragado. Uno de los primeros métodos desarrollados fue el método de *Unidades de Generación de Turbiedad* (TGU por sus siglas en inglés), presentado por Nakai (1978) como una herramienta de predicción para dragas de cuchara, tipo "cutterhead" y de succión en marcha.

En 1995, Collins presentó un modelo para estimar la tasa de resuspensión inducida por dragado para dragas de cuchara, en función del tipo de draga, características operativas y las propiedades de los sedimentos, basándose en observaciones empíricas (Collins, 1995). Este modelo se basa en los siguientes parámetros: velocidad de sedimentación, tamaño del tacho, profundidad y duración del ciclo de dragado. Las concentraciones de SST en la fuente de generación fueron calculadas en función de mediciones de concentración a distintas profundidades y distancias al punto de dragado.

Dicho modelo asume que los sedimentos son resuspendidos en un volumen "fuente" en la columna de agua, durante la fracción del ciclo en que el tacho asciende desde el fondo hasta la superficie. La concentración de sedimentos en ese volumen se supone uniforme y sale de dicho volumen a una tasa que se supone lineal, mientras el tacho desciende hasta el fondo, momento en el cual se supone que todos los sedimentos abandonaron el volumen "fuente". Las tasas de generación de sedimentos obtenidas fueron correlacionadas con concentraciones en la fuente, en base a información existente. Collins concluyó que se había alcanzado una buena correlación entre las concentraciones en la fuente observadas en campo y las modeladas.

La correlación propuesta por Collins (1995) para dragas de cuchara es la siguiente:

$$R/(\rho * 10^{-6}) = 0.0023b^2 (1 + k_{cb}) (b/v_s T)^3 \left[\frac{2(h/T)(1 + k_{cb})}{(f_u + 2f_o + f_d)} \right] \quad (Ec. 1)$$

Donde:

R = tasa de resuspensión de sedimentos (g/s)

ρ = densidad del agua (g/cm³)

b = dimensión representativa de la cuchara (m)

k_{cb} = constante empírica de la cuchara

v_s = velocidad de sedimentación para una partícula media (m/s)

T = tiempo de ciclo de dragado (s)

h = profundidad de dragado (m)

f_u = fracción del ciclo de dragado en que la cuchara asciende por la columna de agua

f_o = fracción del ciclo de dragado en que la cuchara está fuera del agua

f_d = fracción del ciclo de dragado en que la cuchara desciende por la columna de agua

Resuspensión de sedimentos por una obra de dragado en el Río de la Plata.

Caso: Central de Ciclo Combinado (UTE), Punta del Tigre, San José.

En el año 2000 Hayes presentó un modelo para estimar el factor de resuspensión para dragas tipo "cutterhead" (Hayes, 2000). La base fundamental de dichos modelos sigue las hipótesis de Hayes, que plantea que la mayor parte de los sedimentos resuspendidos (para operaciones con dragas tipo "cutterhead") corresponden a las partículas finas que se adhieren a las palas del cabezal al pasar a través de los sedimentos y luego se liberan a la columna de agua al pasar las palas por el agua ("lavado"). Según el mismo Hayes estos modelos deben utilizarse solamente para situaciones similares a las de su desarrollo ya que no se encuentran validados para otras.

El modelo "DREDGE" desarrollado por Hayes & Je (2000) es un modelo estacionario de tipo "screening", para modelar la resuspensión y liberación de contaminantes. Este modelo acopla modelos de resuspensión en la fuente, con un modelo gaussiano de dispersión y un modelo de sedimentación en flujo uniforme. Este modelo estima la tasa a la cual los sedimentos del fondo son suspendidos en la columna de agua, como resultado de operaciones de dragado hidráulico y mecánico, y calcula la resuspensión de sedimentos resultante. Este modelo incorpora algunos de los presentados anteriormente el "TGU Method" (Nakai, 1978), y las correlaciones de Collins y Hayes (Collins, 1995 y Hayes et al., 2000), para modelar la intensidad de la fuente de resuspensión. Estos se combinan con información del sitio para modelar el tamaño y la extensión de la pluma de sedimentos en condiciones estacionarias. Este modelo fue desarrollado especialmente para realizar evaluaciones preliminares de impacto ambiental para proyectos de dragado.

En resumen, existe un amplio rango de modelos que pueden ser utilizados para modelar la resuspensión y transporte de sedimentos. Los modelos simples, que consideran una sumatoria de procesos o solo una porción del problema pueden ser fácilmente implementados rutinariamente y pueden ser útiles en el modelado de la fuente y el campo cercano a la zona de dragado. Esta información puede ser suficiente, por ejemplo, para la definición de la ubicación de puntos de monitoreo adecuados, identificación de áreas de sedimentación y acumulación de sedimentos residuales. Sin embargo, a veces, puede resultar necesaria la implementación de modelos más sofisticados para comprender detalladamente el riesgo potencial en un sitio determinado. Una vez implementados estos modelos pueden servir para predecir la dispersión de sedimentos en el campo lejano del área de dragado. Estos son necesarios, por ejemplo, para modelar procesos complejos como la floculación, sedimentación y erosión, en modelos de flujo en régimen no estacionario (Palermo, 2008).

Con el objetivo de obtener una tasa de resuspensión teórica para el caso de estudio, se aplicó la fórmula presentada por Collins (1995). En la siguiente tabla se resumen los datos utilizados y de qué forma fueron obtenidos.

Resuspensión de sedimentos por una obra de dragado en el Río de la Plata.

Caso: Central de Ciclo Combinado (UTE), Punta del Tigre, San José.

Tabla 2: Datos utilizados para el cálculo de la tasa de resuspensión de sedimentos.

Dato	Unidades	Valor	Fuente
ρ densidad del agua	g/cm ³	1,0	-
b dimensión representativa de la cuchara	m	2,71	Información brindada por el contratista. Volumen de la cuchara = 10m ³
k_{cb} constante empírica de la cuchara	-	1	Normalmente se asume igual a 1 (Collins, 1995; Palermo, 2008)
v_s velocidad de sedimentación para una partícula media	mm/s	0,5	Calculo en base a fórmula propuesta por Soulsby (1997)*
T tiempo de ciclo de dragado	s	100	Registros realizados durante la obra
h profundidad de dragado	m	10	Promedio aproximado de la excavación realizada
f_u fracción del ciclo de dragado en que la cuchara asciende por la columna de agua	-	0,30	Registros realizados durante la obra
f_o fracción del ciclo de dragado en que la cuchara está fuera del agua	-	0,25	Registros realizados durante la obra
f_a fracción del ciclo de dragado en que la cuchara desciende por la columna de agua	-	0,30	Registros realizados durante la obra

*Para el cálculo de la velocidad de sedimentación se utilizó la fórmula propuesta por Soulsby (1997), para uso en ambientes marinos:

$$v_s = \frac{v}{D} [(10,36^2 + 1,049D_*^3)^{1/2} - 10,36] \quad (Ec. 2)$$

Donde:

$$D_* = \left[\frac{gR}{\nu^2} \right]^{1/3} D \quad (Ec. 3)$$

Resuspensión de sedimentos por una obra de dragado en el Río de la Plata.

Caso: Central de Ciclo Combinado (UTE), Punta del Tigre, San José.

con

g = aceleración gravitatoria ($9,81 \text{ m/s}^2$)

ν = viscosidad cinemática del agua ($1 \text{ mm}^2/\text{s}$)

$R = (\rho_s - \rho) / \rho$ es la densidad relativa sumergida de los sedimentos (1,65 con $\rho_s = 2650 \text{ kg/m}^3$)

D = tamaño medio de las partículas ($25 \mu\text{m}$)

Sustituyendo los valores de la Tabla 2 en la formulación propuesta por Collins (*Ec 1*), se obtuvo una tasa de resuspensión de 2 kg/s de sedimentos que se liberan en la columna de agua.

Según información brindada por el contratista, la carga en cada ciclo de la cuchara fue de unos 5 m^3 , por lo que, considerando una porosidad del lecho de 20% y una densidad de los sólidos de 2650 kg/m^3 , dicha tasa corresponde aproximadamente al 2% de los sólidos extraídos por la draga. Se puede observar que este valor se encuentra dentro de los rangos planteados por algunos autores, según se presentó en la Tabla 1. Si consideramos que el volumen "fuente" tiene en promedio 10 m de altura y base igual al área transversal del tacho, la concentración de sólidos en dicho volumen resulta de $2,5 \text{ g/l}$.

6 Normativa y Control.

6.1 Normativa

En este apartado se presenta un repaso de la normativa nacional relacionada a la calidad de los cuerpos de agua y emisiones líquidas. Luego se presentan algunos ejemplos del abordaje de la normativa internacional a los mismos aspectos, y en particular a la turbiedad y la concentración de sedimentos en suspensión.

6.1.1 Normativa nacional.

La Ley Nº 14.859 (“Código de Aguas”) establece que el Estado promoverá, entre otras cosas, la conservación de las aguas. El Artículo 144 de dicha Ley prohíbe introducir en las aguas (o colocar en lugares desde los cuales puedan derivar hacia ellas) sustancias, materiales o energía susceptibles de poner en peligro la salud humana o animal, deteriorar el medio ambiente natural o provocar daños. Dicha Ley también establece que, el Ministerio competente, podrá establecer los límites máximos dentro de los cuales los cuerpos receptores podrán ser afectados por las sustancias, energía o materiales mencionados.

Por otra parte, Uruguay ha suscrito el “Tratado del Río de la Plata y su Frente Marítimo” con la República Argentina, el cual establece (Artículo 48) lo siguiente: “cada parte se obliga a proteger y preservar el medio acuático y, en particular, a prevenir su contaminación, dictando las normas y adoptando las medidas apropiadas, de conformidad a los convenios internacionales aplicables y con adecuación, en lo pertinente, a las pautas y recomendaciones de los organismos técnicos internacionales”.

El Decreto Nº 253, del año 1979, reglamenta el Código de Aguas, en particular en lo que concierne a los aspectos de conservación y preservación de los recursos hídricos, ante los peligros de deterioro, pérdida o mengua de los mismos, provocados por la acción del hombre. El Artículo 3º establece que “los cursos o cuerpos de agua del País se clasificarán, según sus usos preponderantes actuales o potenciales, en cuatro clases”. Existe una resolución del Ministerio de Vivienda Ordenamiento Territorial y Medio Ambiente (MVOTMA) del año 2005, que clasifica en forma genérica en la Clase 3 todos los cuerpos y cursos de agua cuya cuenca tributaria sea mayor a 10 km² y que a la fecha no hubieran sido clasificados.

La Clase 3 se describe como: aguas destinadas a la preservación de los peces en general y de otros integrantes de la flora y fauna hídrica, o también aguas destinadas al riego de cultivos cuyo producto no se consume en forma natural o en aquellos casos que, siendo consumidos en forma natural, se apliquen sistemas de riego que no provocan el mojado del producto. Más allá de lo anterior, que responde a una resolución general, para el caso de estudio, dada la proximidad de la playa de Punta del Tigre, puede resultar necesario evaluar cuales son los límites establecido para la Clase 2 b), definida como “aguas destinadas a recreación por contacto directo con el cuerpo humano” Tanto para la Clase 2b como para la Clase 3, en el Artículo 5 (donde se definen las características que deben cumplir los cursos o cuerpos de agua) se establece un límite de turbiedad de 50 NTU. Puede ser de interés, además, considerar que el mismo decreto (Artículo 11º) establece los límites para vertidos directos a cursos de agua, para los cuales se establece un límite de 150 mg/l, para el parámetro SST.

El documento borrador del grupo GESTA AGUA “Propuesta de modificación del Decreto 253/79 y modificativos” (COTAMA 2007) introduce la siguiente modificación para el objetivo de calidad del parámetro turbiedad: “Incremento de valores históricos en un 10% del valor natural o, en su defecto, 50 NTU”.

Para este proyecto en particular, según lo descrito en el apartado 2.3.1, la autoridad ambiental aprobó un monitoreo en cuatro puntos periféricos a la obra, estableciendo un límite de 130 NTU, en el promedio móvil de tres días consecutivos con dragado. Este requerimiento fue

establecido en la resolución de aprobación del PGAC de la central de ciclo combinado (RD N° 0093/15), en el marco de las autorizaciones ambientales que surgen del Decreto 349/05 (Reglamento de Evaluación de Impacto Ambiental y Autorizaciones Ambientales, decreto reglamentario de la Ley N° 16.466 de 1994 “Ley de Impacto Ambiental”).

6.1.2 Referencias internacionales.

La Organización Mundial de la Salud (OMS) cuenta con una guía donde establece criterios generales en cuanto a la calidad para aguas recreativas (“GUIDELINES ON RECREATIONAL WATER QUALITY” Volume 1 Coastal and Fresh Waters, WHO, 2021), donde se establece que la transparencia en aguas para nado debe ser tal que se pueda estimar la profundidad y detectar fácilmente peligros subsuperficiales o nadadores y buzos en las cercanías. Además de estos criterios de seguridad, menciona que la claridad del agua fomenta el disfrute de los ambientes acuáticos. La Guía menciona que los principales factores que afectan la profundidad de la penetración de la luz en aguas naturales son: la presencia de algas y animales microscópicos, partículas minerales suspendidas, sustancias disueltas, espumas y detritos flotantes.

A nivel internacional existen numerosos convenios y tratados entre países, que buscan controlar la liberación de sustancias en los cuerpos de agua. En general están enfocados en sustancias peligrosas, como pueden ser metales o compuestos orgánicos persistentes (COPs), los cuales pueden estar asociados a sedimentos resuspendidos por actividades de dragado. Por ejemplo, el Convenio de Londres (Convenio sobre la prevención de la contaminación del mar por vertimiento de desechos y otras materias, Londres, 1972) tiene como finalidad promover el control de todas las fuentes de contaminación del medio marino y la adopción de todas las medidas posibles para impedir la contaminación del mar por vertimiento de desechos y otras materias. Actualmente este Convenio incluye al “material de dragado” en la lista de las únicas sustancias que son susceptibles de vertido al mar, siendo la que representa la mayoría de los permisos gestionados a través de este Convenio en todo el mundo. Dentro del ámbito del Protocolo de este convenio, se han redactado directrices, para algunos de los desechos cuyo vertimiento está permitido, en las cuales se detallan los procedimientos para la evaluación de los desechos, la selección de la zona de vertido, los procedimientos de vigilancia, de caracterización, etc.

También existen convenios regionales, como el Convenio OSPAR (Paris, 1992) sobre la protección del medio marino del Atlántico Nordeste, el Convenio HELCOM (Helsinki, 1992) sobre la protección del ambiente marino del área del Mar Báltico o el Convenio de Barcelona (Barcelona, 1976) para la protección del mar Mediterráneo contra la contaminación. Todos ellos tienen como objetivo controlar la contaminación de distintos ambientes marinos, cuyos usos son compartidos por varios países.

En relación a la definición de criterios de calidad de agua, se presenta como ejemplo el código “Code of Federal Regulations” (CFR: TITLE 40 Chapter 1 (EPA) Subchapter D PART 131 - WATER QUALITY STANDARDS) de los Estados Unidos, el cual establece los estándares de calidad de las aguas. En particular, para la Clase III (“Good”) establece que la Turbiedad no puede exceder 10 NTU sobre el valor de fondo, cuando este es menor o igual a 50 NTU, y no puede tener un incremento de más del 20% sobre el nivel de fondo, cuando este es mayor a 50 NTU. (<https://www.ecfr.gov/current/title-40/chapter-1/subchapter-D/part-131>). Dentro de los Estados Unidos, algunos estados usan valores máximos (comúnmente 25 o 50 NTU) y algunos permiten un aumento arbitrario sobre el valor de fondo (Lillycrop, Howell and White, 1996, citado por Palermo, 2008).

La normativa brasilera (Resolução CONAMA N° 357, del 17 de Marzo de 2005), establece, por ejemplo, para “águas doces - classe 3”, un límite fijo al igual que la normativa nacional, en este caso de 100 NTU.

Resuspensión de sedimentos por una obra de dragado en el Río de la Plata.

Caso: Central de Ciclo Combinado (UTE), Punta del Tigre, San José.

Para España, el Real Decreto N° 817 de 2015 establece los criterios de seguimiento y evaluación del estado de las aguas superficiales, en función de su estado ecológico y químico. En este caso la clasificación es por tipo de cuerpo de agua, no por los usos potenciales, y existen solamente dos categorías en que este tipo de parámetros aplican: Disco Secchi para “Lagos” y Turbiedad para “Agua de transición y costeras muy modificadas por la presencia de puertos” (Anexo II, Apartados B y F). Otro ejemplo similar, pero con parámetros distintos, es el caso de Australia. En la guía “Guidelines for Fresh and Marine Water Quality”, se establecen criterios de calidad de agua para aguas recreacionales. En el caso de las aguas de uso paisajístico, se establece que la claridad natural no debe reducirse en más de un 20% y, por otro lado, para aguas usadas para nado, se establece que la visibilidad de Disco Secchi, en horizontal, debe exceder los 1,6m.

En relación a las obras de dragado y los límites que aplicarían, en general parece haber consenso en que es necesario evaluar cada proyecto particular y establecer límites *ad oc*, en función de las características del proyecto y el medio receptor. Por ejemplo, el mismo CFR (TITLE 40 Part 230 Section 404(b)(1) Guidelines for Specification of Disposal Sites for Dredged or Fill Material, Subpart B-- Sec. 230.10 Restrictions on discharge) define que la autoridad competente es la que debe establecer, para cada proyecto de dragado o disposición de material dragado, cuáles son los requerimientos en cuanto a límites o incrementos de turbiedad para cada caso, teniendo en cuenta la naturaleza y grado de afectación que la propuesta puede tener sobre el ambiente receptor. Más allá del análisis caso a caso, algunos estados establecen criterios generales, muchas veces asociados a cuerpos de agua específicos, limitando las actividades de dragado en función de distintos criterios. Estas limitaciones pueden ser temporales (épocas del año, número de días por año u horas por día, etc.), por superficie afectada o volumen de material extraído.

En la “Ley de Costas” española (Ley 22/1988, Sección 3a “Extracción de áridos y dragados”, Artículo 63), se establece que, para otorgar las autorizaciones de dragados, es necesaria la evaluación de sus efectos sobre el dominio público marítimo-terrestre, referida tanto al lugar de extracción como al de descarga del material dragado. Se establecen allí también las condiciones que deben considerarse para la autorización, como plazos, volumen a extraer o depositar, procedimientos, maquinaria y medios de control.

España cuenta también con el documento “Directrices para la caracterización del material dragado y su reubicación en aguas del dominio público marítimo-terrestre” (Comisión Interministerial de Estrategias Marinas, 2021). Estas Directrices establecen los requisitos para los Programas de vigilancia ambiental, de carácter obligatorio para el promotor de la actividad, los cuales deben estar diseñados acorde a la magnitud del proyecto, las características de los sedimentos y las particularidades de la zona de ejecución. En particular, los Programas deben asegurar que se controlen los efectos sobre la calidad de la masa de agua o las zonas sensibles que pudieran existir en el entorno. Algunos de los controles que se prevén, dependiendo de las características de la zona de dragado, son: el control de la calidad del agua en relación con la turbiedad generada por la operación de dragado y el control de posibles impactos sobre los hábitats o especies protegidas, con especial atención a la deposición sobre los mismos de material particulado. Estos controles deberán tener definida una frecuencia temporal con que se realizarán las medidas y la toma de muestras, así como de los parámetros a determinar sobre cada una de las muestras, estableciéndose, en su caso, umbrales o condiciones límite para los indicadores ambientales que determinen la necesidad de adoptar medidas complementarias, que minimicen los efectos no deseados inducidos por la ejecución del dragado.

En algunos casos, como el del Estado de Victoria (Australia), existen criterios de calidad de agua y objetivos ambientales para varias regiones costeras, preestablecidos en función de características específicas de cada región y tipos de proyectos. Por ejemplo, existen límites de

turbiedad permitidos para el dragado en áreas con presencia de “seagrass”⁴, no pudiendo superar 5 NTU sobre el mismo, de forma de asegurar la fotosíntesis y proteger el ecosistema. En lugares donde el “seagrass” crece a mayor profundidad los límites pueden hacerse incluso más estrictos. Más allá de esas definiciones particulares, dicho Estado también establece que es el ministerio competente quien debe otorgar los permisos correspondientes, para cualquier uso o desarrollo de las zonas costeras, incluyendo el dragado y disposición de sedimentos.

6.2 Medidas de control.

Las medidas de control para reducir la resuspensión y transporte del material dragado, pueden dividirse entre medidas operativas y medidas de ingeniería. Las medidas de control operativas incluyen acciones que pueden ser tomadas por el operario de la draga para reducir los impactos del dragado, mientras que las medidas de ingeniería en general implican instalaciones físicas.

En general estas medidas son utilizadas mayormente cuando existe contaminación de los sedimentos y, reduciendo la resuspensión, se busca reducir la liberación de contaminantes en la columna de agua.

Algunos ejemplos de medidas de control son:

- Reducir las tasas o intensidad de dragado
- Evitar la sobrepenetración (aplicable fundamentalmente a las dragas de pala y de cuchara)
- Evitar la práctica de “overflow” de barcasas o desde las dragas de succión en marcha
- Realizar ajustes de la operación en función de las condiciones del sitio, como las mareas, el oleaje, corrientes y viento.
- Para las dragas de cabezal de corte (“cutterhead”), es posible modificar la profundidad y rotación del cabezal y del tubo de succión y la velocidad de avance de la draga.
- Modificar la velocidad de izamiento en dragas de cuchara, lo cual puede ser complementado utilizando dispositivos para contener los derrames y tanques de enjuague para cada ciclo.
- Ajustar el número de “pasadas”, optimizando la captura de sedimentos.

Por otro lado, el transporte de los sedimentos una vez resuspendidos, puede reducirse utilizando barreras físicas en el entorno de las actividades de dragado. Estas barreras pueden consistir en diques de contención, entibado con tablaestacas o barreras flexibles, del mallas o cortinas. Posiblemente estas últimas sean el tipo de barreras más utilizadas con fines de minimización del transporte de sedimentos.

Las barreras flexibles generalmente consisten en mallas plásticas que cuelgan desde la superficie, gracias a cadenas de flotadores y se anclan al fondo empleando anclas o lastres. Las mallas pueden llegar o no hasta el fondo y ser más o menos permeables, reteniendo una gran parte de los sólidos suspendidos (Averett et al., 1990).

Las barreras estructurales pueden ser necesarias cuando se requiere contener sedimentos que contengan contaminantes con alta movilidad y/o altamente tóxicos o en áreas de gran sensibilidad ambiental, cuando no se puedan asegurar las condiciones para que las barreras flexibles sean realmente efectivas. (p.ej.: corrientes muy intensas o gran amplitud de mareas).

⁴ El término “seagrass” hace referencia a varias especies de algas (por ejemplo, *Heterozostera tasmanica*) que forman densos “pastizales” submarinos y proveen hábitat y alimento a muchos organismos marinos, conformando ecosistemas de gran valor ambiental.

6.3 Monitoreo.

Teniendo en cuenta lo expuesto hasta ahora, resulta inmediato que los sedimentos en suspensión sean uno de los principales objetos de monitoreo ambiental de una obra de dragado. En este apartado se presentan los principales aspectos a considerar a la hora del diseño de los planes de monitoreo, centrándose en los parámetros a monitorear, tanto directos como indirectos, usados para el control de los sólidos en suspensión y sus efectos.

6.3.1 Generalidades.

Los objetivos del monitoreo, así como los equipos y técnicas, el muestreo y los análisis a realizar, deben estar documentados en un plan de monitoreo. Estos planes deben indicar quien, que, cuando, donde y como se debe realizar cada tarea. Algunos de los contenidos que deben incluir estos planes, según Palermo (Palermo, 2008) son los siguientes:

- Contexto y objetivos
- Roles y responsabilidades
- Antecedentes e Información disponible
- Definición de área de influencia y puntos de cumplimiento normativo
- Ubicación de puntos de muestreo y/o instalación de equipos de medición
- Equipos de monitoreo y de muestreo
- Profundidad, duración, número de muestras, métodos de toma, etiquetado, acondicionamiento, cadena de custodia y análisis a realizar
- Criterios ambientales aplicables para comparar los resultados
- Análisis y reporte de la información
- Plan de acción en función de los resultados (aumento de frecuencia de monitoreo, medidas de control operacionales o de ingeniería, cambio de equipos o metodologías, detención del dragado, etc.)

El parámetro más directo y comúnmente utilizado es Sólidos Suspendidos Totales (SST), aunque existen otros parámetros que representan características físicas del cuerpo de agua, que se ven modificadas ante cambios en la concentración de los sólidos en suspensión y, por lo tanto, pueden ser una medida indirecta de los mismos. Por otra parte, algunas de esas características, por ejemplo, la turbiedad o la transparencia del agua, pueden ser de interés, no solo como una medida indirecta de los SST, sino que, como ya se ha presentado, por sí mismas pueden implicar impactos en el medio.

Debido a que el parámetro SST requiere procesamiento de la muestra y determinación en laboratorio, las medidas indirectas son frecuentemente utilizadas, debido a la mayor facilidad de determinación en campo, lo cual también puede permitir el monitoreo continuo y la posibilidad de contar con resultados en tiempo real.

Además de la concentración de sedimentos, la determinación y seguimiento de la extensión espacial de la pluma, pueden ser de utilidad para verificar el diseño del plan original de monitoreo. Esto permitiría mejorar la interpretación de los resultados obtenidos y determinar áreas de potencial impacto, así como la persistencia de la pluma sobre dichas áreas. Para comprender el comportamiento de la pluma de sedimentos, también es necesario el monitoreo de corrientes, oleaje y niveles en el cuerpo receptor. Esto se debe a que las corrientes transportan los sedimentos, mientras que las olas aumentan la turbulencia, evitando la sedimentación y aumentando la resuspensión de sedimentos, y los niveles ayudan a definir los ciclos de mareas y las profundidades en la zona de dragado y disposición.

Como se verá a continuación, existen numerosos parámetros que permiten medir o estimar los SST y la turbiedad en la columna de agua. Puckette (1998) los divide en cuatro categorías: muestreo in situ, monitoreo acústico, monitoreo remoto y trazadores. El muestreo in situ puede

implicar la instalación de instrumentos o hundimiento de sondas en la columna de agua o la extracción de muestras para su análisis posterior (pudiendo ser el análisis in situ o en laboratorio).

A continuación, se describen los métodos, directos o indirectos, para el monitoreo de sólidos suspendidos en un cuerpo de agua, y se plantean algunas particularidades asociadas a su determinación y la posibilidad de establecer relaciones entre los distintos métodos o parámetros.

6.3.2 Parámetros y métodos.

Cuando se requiere determinar la cantidad de partículas suspendidas en un cuerpo de agua, la determinación de los SST es el parámetro más directo y suele ser el más utilizado. Sin embargo, el parámetro SST no tiene una determinación instantánea, por lo que, si resulta necesario, se debe optar por otros parámetros o métodos indirectos para su determinación.

A la hora de definir los parámetros o metodologías a emplear, se deben tener en consideración numerosos aspectos, los cuales se deben analizar detenidamente antes de su selección, teniendo siempre presente el objetivo y alcance del monitoreo a realizar. Según la bibliografía consultada (Barua, 2001 y Felix, Albayrak y Boes, 2016), los principales criterios a considerar son los siguientes:

- Costos (instrumentos, instalación, operación y mantenimiento)
- Duración del monitoreo
- Tiempos de adquisición y procesamiento de los datos
- Necesidad de medición continua o incluso con resultados en tiempo real
- Facilidad operativa (accesibilidad de los sitios de muestreo, logística de muestreo, transmisión de datos, etc.)
- Representatividad, precisión y confiabilidad de la técnica (en cuanto a las características de los sedimentos que se busca monitorear, por ejemplo: rangos de concentración y tamaño de partículas, variaciones temporales y espaciales, grado de correlación entre SST y tamaño de partículas, etc.)
- Disponibilidad, formación y experiencia requerida del personal involucrado

En los siguientes puntos se introducen algunos de los parámetros más utilizados y su relación con los SST y algunos otros métodos de determinación indirectos. Existen numerosos trabajos publicados que presentan recopilaciones y comparaciones exhaustivas entre los distintos métodos (por mencionar algunos ejemplos: Wren et al, 2000, Gray & Gartner, 2009 y Rai & Kumar, 2015).

6.3.2.1 Sólidos suspendidos totales.

Los sólidos suspendidos totales corresponden a la determinación de la masa (en peso seco) de los sólidos no disueltos, por unidad de volumen de agua (normalmente expresados en mg/l). Los SST incluyen sólidos inorgánicos, como las arcillas, limos, arenas, etc., así como sólidos orgánicos, como pueden ser algas, zooplancton y detritus (APHA/AWWA/WEF, 1999). Analíticamente, se aplica a los residuos de material que quedan en un filtro después de la evaporación en estufa a 103-105 °C. Los Sólidos Suspendidos Fijos (SSF) corresponden a los residuos remanentes del incinerado a 550 °C y los Sólidos Suspendidos Volátiles (SSV) corresponden a los compuestos perdidos durante la calcinación a 550 °C (DINAMA, 2009).

Aunque el parámetro apunta a determinar todos los sólidos no disueltos en el agua, existe una fracción que puede pasar a través del filtro y no se encuentra disuelta (aproximadamente entre 0,45 y 0,1 µm). Debido a esto, Puckette (1998) plantea que este parámetro podría llamarse de forma más rigurosa como "sólidos suspendidos no filtrables".

Según bibliografía consultada (Thackston & Palermo, 2000), la mayoría de los monitoreos para permisos de dragado se basan en el parámetro SST, porque presenta una buena correlación con los impactos ambientales asociados y es comparable de un sitio a otro y entre distintos tipos de sedimentos. Sin embargo, la determinación de los SST requiere el envío de las muestras al laboratorio y el tiempo de procesamiento correspondiente, lo cual representa su principal desventaja frente a otros métodos. Dado que muchas veces es necesario tener datos en tiempo real, para poder aplicar a tiempo medidas de control o modificaciones sobre las prácticas de dragado, suele utilizarse la turbiedad como medida indirecta.

6.3.2.2 Turbiedad.

La turbiedad refiere a la “opacidad” de una masa de agua. El concepto de turbiedad involucra propiedades ópticas y no una medida directa de la concentración de sólidos suspendidos. Este parámetro ha sido ampliamente usado como parámetro de calidad de agua, debido a su fácil y rápida determinación. La turbiedad se define como la determinación óptica de la luz que es dispersada y absorbida mientras pasa a través del agua (APHA/AWWA/WEF, 1999). Expresa la atenuación de la luz debida a la absorción y dispersión a través de la misma, debido a materia suspendida, tanto orgánica como inorgánica y debido a sustancias disueltas (McCarthy et al., 1974) e incluso por las propias moléculas de agua (Puckette, 1998).

Principalmente, la turbiedad es causada por material particulado suspendido y el efecto de las sustancias disueltas es generalmente muy minoritario en aguas naturales. A los efectos de la turbiedad, el material particulado puede comprender sólidos inorgánicos, sólidos orgánicos o detritus (partículas orgánicas producto de descomposición animal o vegetal) y organismos vivos como el fitoplancton y el zooplancton (Anchor Environmental CA, 2003). Mientras que los SST dependen del número, tamaño y la gravedad específica de las partículas, la turbiedad, además de la concentración y el tamaño de las partículas, también se ve afectada por su forma, área superficial, color, índice de refracción y espectro de absorción. Normalmente se considera que la concentración es el principal factor que controla la turbiedad, pero alguno de los otros factores pueden causar efectos significativos (Thackston & Palermo, 2000).

Las unidades más utilizadas para reportar valores de turbiedad son las Unidades Nefelométricas de Turbiedad (NTU), las cuales se definen basándose en una solución estándar de suspensión de formacina en agua (Sulfato de Hidracina y Hexametilentetraamina, en proporciones determinadas).

Los equipos utilizados para la determinación de la turbiedad son llamados turbidímetros. Estos equipos proyectan un rayo de luz sobre la muestra de agua y miden la cantidad de luz recibida por sensores ubicados en una posición determinada (típicamente a 90°, en los llamados nefelométricos, aunque también existen equipos tipo OBS, por “optical backscatter sensor”, debido a que el ángulo donde se ubican los sensores es mayor a 90° (ver Figura 33)).

Los turbidímetros funcionan en general con luz infrarroja, en un rango particular de longitudes de onda, por lo que el retorno de partículas orgánicas resulta mucho menor (del orden de seis veces menor) que el de las partículas de sedimento. Esto los hace adecuados para medir plumas de sedimentos in situ, ya que la señal no se ve significativamente afectada ante la presencia de materia orgánica (Campbell Scientific Inc., 2017).

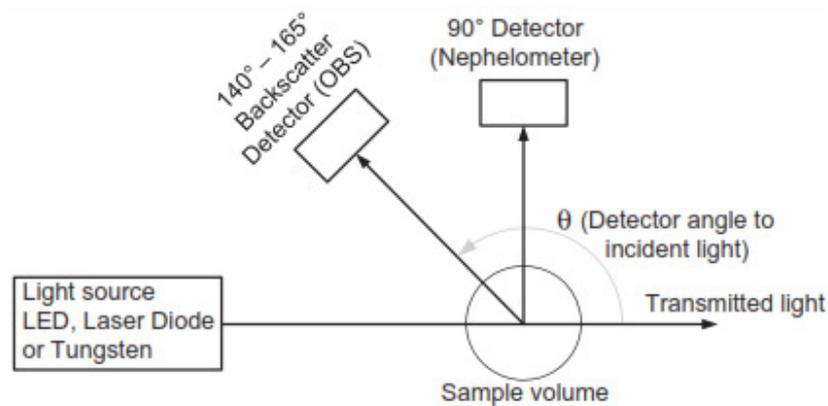


Figura 33: posición relativa entre la fuente de luz y los detectores en un turbidímetro (Fuente: Rai & Kumar, 2015).

Este tipo de equipos permiten determinar rápida y fácilmente la turbiedad in situ, incluso de forma continua, por lo que suelen utilizarse para estimar los SST usando curvas de calibración empíricas. Estas curvas son específicas para cada sitio y pueden estar sujetas a errores significativos o incluso puede no ser posible establecerlas debido a variaciones en las características del material suspendido (Puckette, 1998).

En general se presentan ecuaciones de la forma

$$C = k * T \quad (\text{Ec. 4})$$

Donde:

C es la concentración de sólidos suspendidos totales (mg/L)

k es una constante

T es la turbiedad (NTU)

6.3.2.3 Trasmisión de luz.

La extinción de la luz en aguas naturales es causada por el agua en sí misma, por sustancias disueltas y por la materia en suspensión. Este último es el factor principal en aguas con alta turbiedad (Postma, 1961). En contraposición a la turbiedad, la trasmisión de la luz es una medida de la cantidad de luz que pasa directamente a través del agua y que no es dispersada ni absorbida. La cantidad de luz transmitida puede verse afectada por la forma, distribución de tamaños y opacidad de las partículas, además de su concentración.

El funcionamiento básico de los equipos que miden la trasmisión la luz (trasmisómetros), es similar al de los turbidímetros, pero los sensores receptores de luz se ubican enfrentados a la fuente. Por lo que, a diferencia de los anteriores, estos equipos miden la cantidad de luz que atraviesa la muestra de agua (ver Figura 34). Debido a su facilidad de determinación en campo, la trasmisión de la luz puede ser usada como parámetro de monitoreo en obras de dragado, para medir la claridad del agua y la penetración de la luz. Provee información directa relevante por ejemplo para la producción fotosintética, pero también indirecta de otros parámetros, como los SST (MBC, 2000).

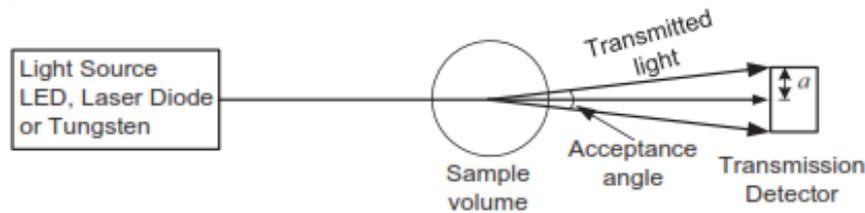


Figura 34: Posición relativa entre la fuente de luz y los detectores en un trasmisómetro (Fuente: Rai & Kumar 2015).

6.3.2.4 Profundidad de Disco Secchi.

El Disco Secchi es un instrumento estandarizado para medir la visibilidad relativa o la profundidad de penetración de la luz en el agua, lo cual está directamente asociado a la turbiedad en la columna de agua y por lo tanto a los sólidos suspendidos. Este método normalmente consiste en un círculo de unos 20 a 30 cm de diámetro, dividido en cuadrantes pintados alternadamente de negro y blanco, atado a una cuerda graduada o regla. El disco se sumerge en el agua hasta que deja de verse y se registra dicha profundidad, obteniéndose una medida dependiente de la transparencia del agua. Algunos autores (Steel & Neuhauser, 2002) plantean una variante, donde el disco se hunde hasta que deja de verse y luego se eleva y se registra la profundidad en que vuelve a ser visible, promediando ambas profundidades para obtener el valor final.

El Disco Secchi tiene la ventaja de ser un método simple, rápido y económico, aunque resulta ser un método relativamente impreciso y tiene limitaciones en cuanto su aplicación, particularmente debido a la profundidad y corrientes del cuerpo de agua. Otros factores que pueden afectar las medidas son el ángulo de incidencia de los rayos solares y la rugosidad de la superficie del agua (Preisendorfer, 1986).

Jones & Willis (1956) encontraron una relación lineal entre la concentración de SST (C) y el coeficiente de atenuación de la luz (μ) para suspensiones artificiales. También encontraron una relación lineal entre μ y $1/D$ (donde D es la profundidad medida con Disco Secchi) para agua marina, lo que implica una relación lineal entre C y $1/D$, pero solo en un rango limitado y válida para un sitio específico y una suspensión específica. Por otra parte, Steel & Neuhauser (2002) realizaron un análisis comparativo entre lecturas realizadas con cuatro métodos distintos: disco Secchi vertical, disco Secchi horizontal, disco negro horizontal y un turbidímetro portátil. Los resultados obtenidos para los tres discos mostraron una muy buena correlación, que disminuye a medida que el agua es más clara (lecturas más altas). La correlación entre los discos y el turbidímetro fue menor pero consistente, según los autores.

Varios autores (entre ellos Jones & Wills, 1956, Postma, 1961 y Manheim, 1970) han mostrado que la relación entre la profundidad medida y la concentración de sólidos suspendidos puede ser descrita mediante una curva hiperbólica del siguiente tipo:

$$D = k * \frac{d\rho}{w} \quad (Ec. 5)$$

Donde:

D es la lectura de profundidad de Disco Secchi

k es una constante

d es el diámetro medio de las partículas

ρ es la densidad de las partículas

w es la concentración de sólidos suspendidos

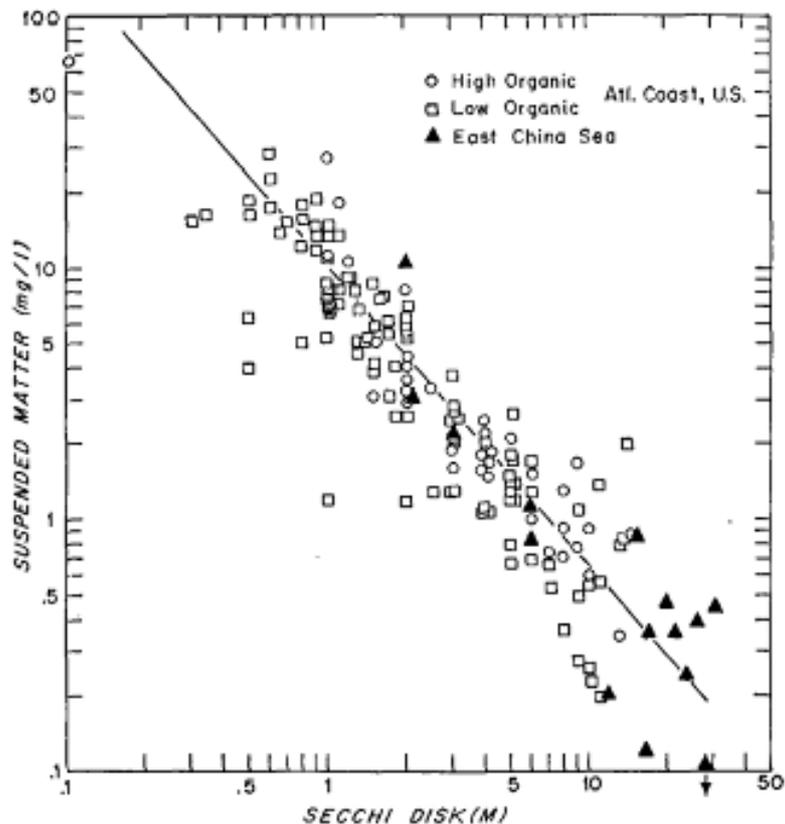


Figura 35: Relación entre concentración de sedimentos en suspensión y profundidad de disco Secchi presentada por Manheim (Fuente: Manheim, 1970).

Un resultado interesante es el presentado por Postma (1961), quien presentó resultados de esta correlación para distintas locaciones. Los resultados fueron divididos en dos grupos, los que mostraron una concentración de material suspendido no influenciada por las mareas y los que la acción de la marea es significativa. Los resultados del primer grupo mostraron que, para distintos cuerpos de agua, la relación entre $1/D$ y la concentración SST es una línea recta que pasa por el origen. En cada locación dicha relación presentó distintas pendientes, lo cual estaría expresando las diferencias en la distribución granulométrica de los sedimentos y distintos porcentajes de materia orgánica presente. El Segundo grupo mostró que en áreas con fuertes corrientes de marea dicha relación sigue siendo una recta, pero que no pasa por el origen. Esto se fundamenta en que, en una misma locación, la granulometría de los sedimentos suspendidos puede variar con el ciclo de mareas (a mayor intensidad de corriente, aumenta el tamaño de las partículas suspendidas).

6.3.2.5 LISST (Laser in situ scattering and transmissometry).

La técnica llamada "LISST" por sus siglas en inglés (*Laser in situ Scattering and Transmissometry*), basada en la difracción de luz láser, también permite la estimación de la concentración de sólidos suspendidos en una muestra de agua. Como principal ventaja frente a los otros métodos, esta técnica también permitiría la determinación in situ de la distribución granulométrica de las partículas presentes en la muestra. Dicha ventaja también puede implicar una reducción de las incertidumbres que introduce la variación de la granulometría (por ejemplo, en comparación con los métodos basados en la turbiedad o en acústica) ya que la LISST toma en cuenta dicha información a la hora de estimar la concentración de los SST (Felix, 2016).

En los instrumentos que trabajan con esta técnica, se hace pasar un rayo de luz láser a través del agua y se mide la difracción (en múltiples ángulos) y la atenuación, causadas por las partículas suspendidas. En la Figura 36 se muestra un esquema de su funcionamiento.

La información obtenida es transformada en una distribución granulométrica de las partículas en suspensión y el volumen total de partículas, el cual puede convertirse luego en concentración de sólidos suspendidos (Felix, 2017).

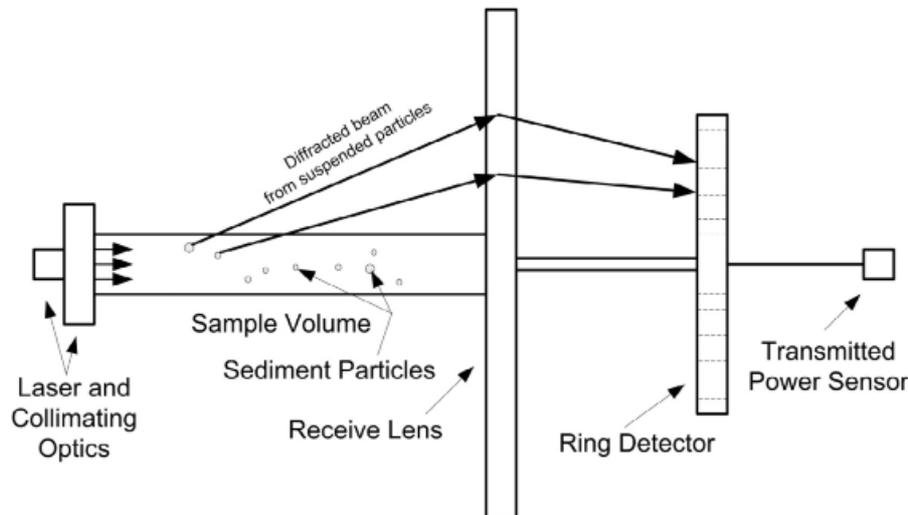


Figura 36: Esquema de funcionamiento de un equipo LISST (Fuente: Rai & Kumar, 2015).

6.3.2.6 Retorno acústico.

El uso de perfiladores acústicos de corrientes (ADCP por sus siglas en inglés), utilizados para el registro de intensidades de corriente, oleaje y niveles, también permiten la asociación de la intensidad del retorno acústico con la abundancia de partículas que se encuentran en la columna de agua (IMFIA, 2016). Esto permite obtener una medida indirecta de los sólidos suspendidos en la columna de agua, con la limitante de que el retorno acústico depende de la cantidad total de partículas reflejantes del sonido. Por ejemplo, las cianobacterias, al igual que los sedimentos, pueden reflejar el sonido incrementando el retorno acústico, lo cual podría producir una interferencia significativa.

A diferencia de los turbidímetros, que realizan la medición en un punto, estos equipos son capaces de “ver” lo que sucede en una sección de la columna de agua. Esto permitiría identificar superficies reflejantes o puntos de inflexión en el perfil de velocidades o concentraciones, que podrían indicar estratificación en la columna de agua. Esto podría resultar útil para monitorear el movimiento de una pluma de sedimentos.

Al igual que la Turbiedad, la intensidad del retorno acústico podría correlacionarse empíricamente con los SST, realizando mediciones y tomando muestras para determinar su concentración. Nuevamente, las principales limitantes serían las variaciones en la granulometría y los rangos de concentraciones de sedimentos, tanto en tiempo como en el espacio (Puckette, 1998 y Felix, 2016)

También se han formulado relaciones teóricas para obtener SST a partir de mediciones de retorno acústico, basándose en el efecto de “dispersión de Rayleigh” sobre la emisión y el retorno del ADCP, dada la presencia de partículas de mucho menor tamaño que la longitud de onda de la emisión correspondiente. Según Tubman (1995) la aplicación de estas formulaciones requiere el conocimiento de la distribución granulométrica del material en suspensión, la

salinidad, temperatura, densidad, velocidad del sonido en el cuerpo de agua y la determinación de ciertas constantes relacionadas con la intensidad de las señales emitidas y recibidas.

6.3.2.7 Otros métodos.

Es interesante ver que existe un gran número de otros métodos alternativos, con principios y técnicas muy diferentes, que permiten obtener información sobre los sólidos suspendidos en una muestra o cuerpo de agua. A continuación, se describen brevemente algunos de ellos.

6.3.2.7.1 Teledetección por fotografía aérea o satelital.

Un método comúnmente empleado para el monitoreo remoto de plumas de sedimentos, aunque mayormente utilizado para plumas de gran escala (por ejemplo, de descargas fluviales), es la teledetección mediante la utilización de fotografías aéreas o satelitales. En condiciones adecuadas, estas pueden proveer buena información sobre la extensión espacial de plumas de sedimentos, aunque la luz del día y las condiciones atmosféricas suelen ser las principales limitantes de esta metodología. A su vez, en casos de aguas con alta turbiedad natural, puede ser muy difícil distinguir las plumas de resuspensión.

6.3.2.7.2 Extinción de luz PAR.

Otro parámetro utilizado para medir la atenuación de la luz en la columna de agua, es la extinción de la luz PAR (por las siglas en inglés de *radiación fotosintéticamente activa*). PAR es la cantidad de radiación integrada del rango de longitudes de onda que son capaces de producir actividad fotosintética en plantas, algas y bacterias (aproximadamente entre los 400 y los 700 nanómetros). La penetración de la radiación PAR se mide en términos relativos, como porcentaje pasante de la radiación total incidente sobre la superficie del agua o como un coeficiente de extinción de la luz. Estos valores se calculan a partir de mediciones hechas a distintas profundidades con un irradiómetro, que es un dispositivo capaz de medir la radiación incidente. Aunque el objetivo principal de estas mediciones es determinar la luz disponible para los organismos fotosintéticos a distintas profundidades, los resultados podrían relacionarse con la presencia de sólidos suspendidos en la columna de agua.

6.3.2.7.3 Trazadores.

El uso de trazadores es usual para evaluar el comportamiento de plumas de emisarios subacuáticos, pero no para plumas de obras de dragado. A pesar de ello, es posible encontrar alguna referencia, como el trabajo realizado por Marsh (1994), donde se describe el uso de trazadores en una obra de dragado con inyección de agua. En dicha experiencia, se inyectó un volumen conocido de un trazador (en ese caso se usaron partículas fluorescentes) sobre el chorro del inyector de agua de la draga, durante un periodo de tiempo determinado. Luego de 5 días se tomaron muestras de agua y sedimentos en distintas ubicaciones, lo cual permitió establecer donde se depositaba el material resuspendido, lo cual se correlacionó bien con mediciones posteriores del espesor del material sedimentado. Mediciones de la concentración del trazador realizadas 1 año después, fueron de utilidad para entender el movimiento a largo plazo de los sedimentos depositados. Marsh indica que puede ser de utilidad el uso de trazadores en obras de dragado, especialmente en estudios de depósito de sedimentos, donde existen áreas sensibles y para el estudio de los movimientos a largo plazo.

6.3.2.7.4 Presión.

Los sensores basados en diferencias de presión, en general consisten en dos sensores de presión de alta sensibilidad, ubicados a distintas profundidades de la columna de agua. La diferencia de densidad medida se transforma en concentración de sólidos, considerando algunas correcciones, como por ejemplo por temperatura, salinidad o velocidad del flujo.

6.3.2.7.5 Procesamiento de imágenes digitales.

El procesamiento de imágenes digitales (video-microscopía) de los sedimentos en una muestra de agua, tiene el potencial de brindar información sobre la concentración de sedimentos y la distribución de tamaño y forma de las partículas.

6.3.2.7.6 Radiación nuclear.

Los métodos basados en la radiación nuclear generalmente buscan medir el resultado de irradiar una muestra de agua con sedimentos en suspensión. Se irradia la muestra con una fuente artificial y, al igual que los dispositivos basados en propiedades ópticas, se colocan sensores receptores en distintas posiciones, dependiendo del equipo. Existen otros métodos que se basan en la medición de la radiación emitida naturalmente por los propios sedimentos.

7 Resultados y análisis de los monitoreos.

Como fue presentado en el apartado 2.3 *Monitoreo de calidad de agua del Río de la Plata.*, durante las obras de dragado se realizaron en paralelo dos campañas de monitoreo:

- monitoreo para el control de la obra marina (“monitoreo de obra”), con el objetivo de controlar la suspensión y transporte de sedimentos durante el dragado.
- monitoreo realizado en el marco del convenio UTE-UdelaR (“monitoreo UdelaR”).

El primer objetivo de este apartado es presentar los resultados obtenidos de ambas campañas de monitoreo, tanto en lo relacionado con sedimentos en suspensión, como con otras variables de interés. A continuación, se presenta un análisis de dichos resultados, con el objetivo de profundizar en el conocimiento del comportamiento del RdIP en la zona, sobre todo, en cómo se relaciona la turbiedad con las demás variables. También se incluye una comparación del comportamiento de las distintas variables, entre los periodos con obra y sin obra de dragado, y como pueden influir estas en el cumplimiento del criterio ambiental establecido. Finalmente se presenta una discusión sobre los principales resultados obtenidos.

7.1 Resultados de los monitoreos.

7.1.1 Monitoreo de obra.

El monitoreo de obra, ejecutado por la empresa contratista, se realizó durante el período en que hubo obras marinas (entre el 01/02/2016 y el 31/10/2019), siempre y cuando se estuviera realizando dragado, transporte y/o disposición de sedimentos en el área de la obra. Se realizó sobre cuatro puntos perimetrales de la obra, según se presentó en 2.3.1 *Monitoreo de control ambiental del dragado.*

Para la medición de la turbiedad se utilizó un turbidímetro portátil (modelo: TN-100, fabricante: Eutech Instruments) y la profundidad de Disco Secchi se midió con un disco de 20 cm de diámetro, con cuadrantes color blanco y negro alternados. Estas mediciones se realizaron en el entorno de las 13:00 hs, tomándose las muestras de turbiedad a media columna de agua aproximadamente, en cada punto.

En la Tabla 3 se resumen los resultados generales del monitoreo de obra, presentando los valores de media, máximo y mínimo para cada variable, en cada uno de los 4 puntos. Se puede observar que los valores obtenidos para dichos estadísticos son muy similares para cada punto. En relación a la turbiedad, el mínimo valor registrado fue de 3 NTU, mientras que el máximo fue de 325 NTU y las medias promediaron 49 NTU. Las profundidades medidas de Disco Secchi registraron un mínimo de 3 cm, mientras que el máximo fue de 74 cm y las medias promediaron 23 cm.

Tabla 3: Resultados generales del monitoreo de obra (270 muestreos).

Turbidímetro (NTU)				
Punto	1	2	3	4
Media	49,1	48,8	48,7	49,0
Máximo	305,0	324,0	325,0	303,0
Mínimo	5,6	3,0	3,1	5,0
Disco Secchi (cm)				
Punto	1	2	3	4
Media	23	23	23	23
Máximo	71	71	72	74
Mínimo	4	3	4	5

En las siguientes figuras (Figura 37 y Figura 38) se presentan los “box-plots” correspondientes a las series de turbiedad y profundidad de Disco Secchi para cada uno de los puntos. En estos gráficos se observan los cuatro cuartiles, representados por la caja y corchetes en color verdes, dejando por fuera los valores “anómalos” representados con círculos y cruces negras (considerados así para este gráfico) y la media representada por una cruz roja. Se puede observar que las series mostraron un comportamiento muy similar.

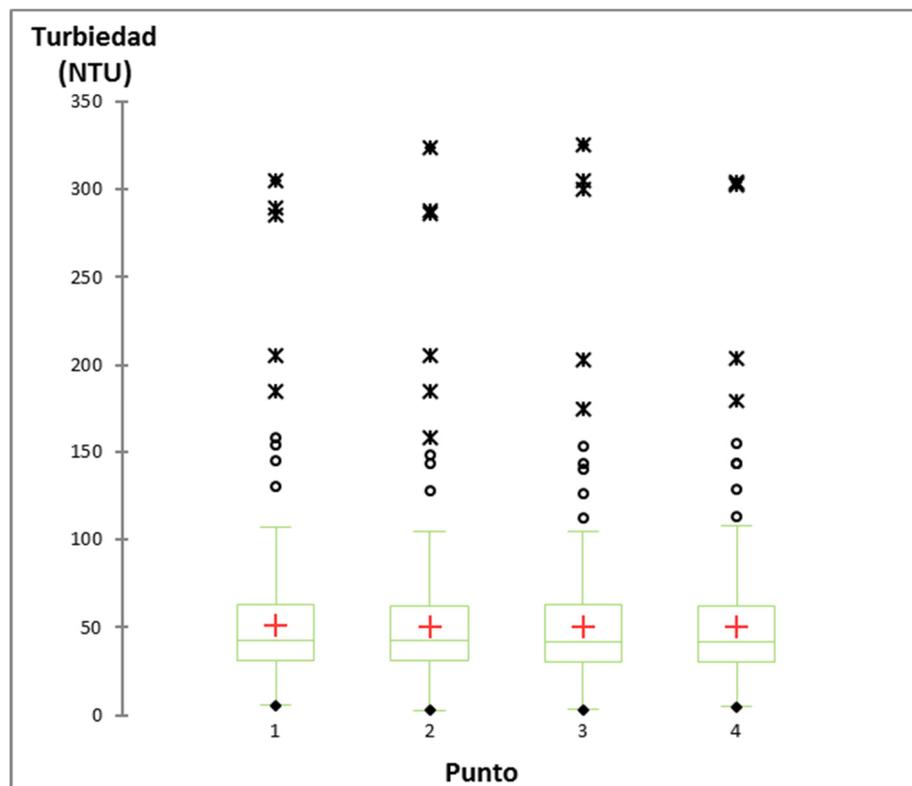


Figura 37: “Box-plots” de las series de turbiedad para cada uno de los puntos del monitoreo de obra (cuartiles representados por cajas y corchetes verdes, valores “anómalos” representados con círculos y cruces negras y media representada por una cruz roja.)

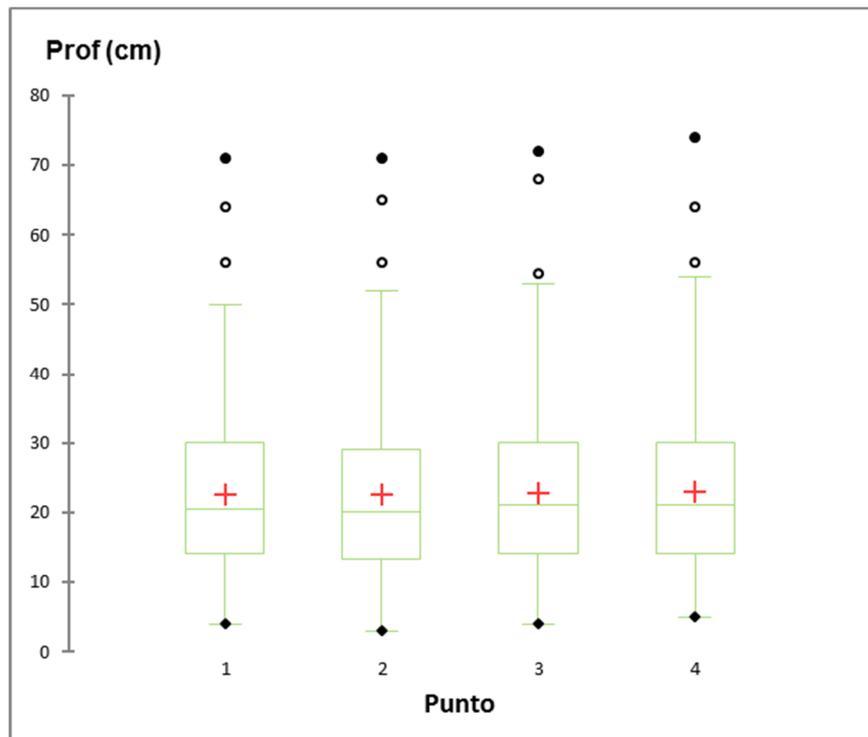


Figura 38: “Box-plots” de las series de profundidad de Disco Secchi para cada uno de los puntos del monitoreo de obra (cuartiles representados por cajas y corchetes verdes, valores “anómalos” representados con círculos negros y media representada por una cruz roja.)

7.1.2 Monitoreo UdelaR.

El monitoreo continuo implementado por UdelaR incluyó las siguientes variables de interés: turbiedad, salinidad, corrientes, oleaje y temperatura del agua. Para ello fueron fondeados un perfilador acústico Doppler de corrientes (ADCP, modelo: Sentinel V, fabricante: Teledyne RDI, EE.UU.), sensores de conductividad, temperatura y presión (CTD, modelo: SBE 19plus V2, fabricante: Sea-Bird, EE.UU.), junto con un sensor de turbiedad (OBS, modelo: OBS3+, fabricante: Campbell Scientific, Inc., EE.UU). Estos equipos fueron fondeados aproximadamente a 850 m de la línea de costa, sobre la cota -3,55 m (Wharton).

Además de los datos monitoreados se utilizaron datos de caudales del Río de la Plata, en base valores diarios de descarga de los ríos Paraná y Uruguay. La fuente de esta información, aportada por el IMFIA, corresponde al Instituto Nacional del Agua de Argentina (INA, www.ina.gov.ar).

Los datos analizados en este trabajo comprenden el periodo desde el 12/02/2015 al 16/04/2020, incluyendo datos previos a las obras, durante y posteriores a las mismas.

7.1.2.1 Turbiedad.

La serie de turbiedad mostró una media de 42 NTU, con un valor máximo de 394 NTU y un mínimo muy cercano a 0. En el siguiente gráfico (Figura 39) se presenta la serie temporal de los valores de turbiedad medidos en continuo, mientras que en la Figura 40 se presenta el histograma correspondiente a dichos valores.

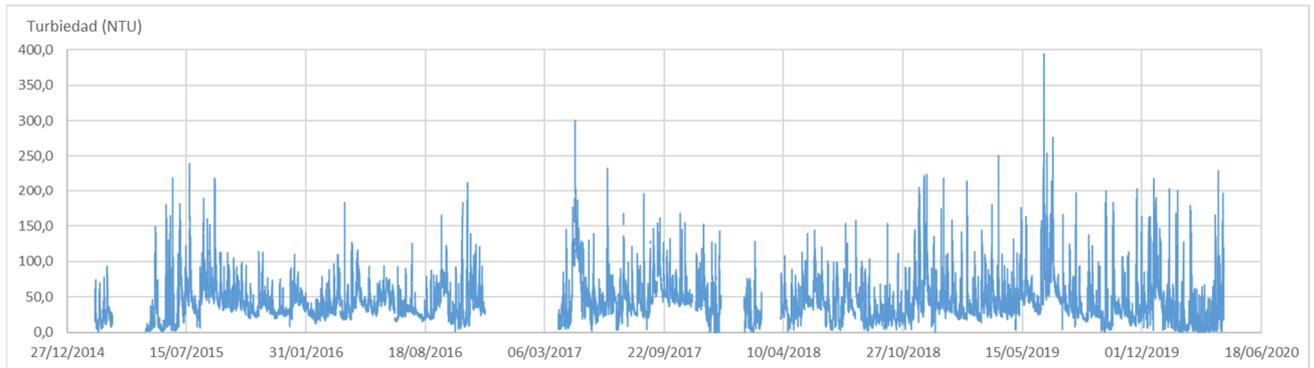


Figura 39: Serie de turbiedad (NTU) medida en continuo.

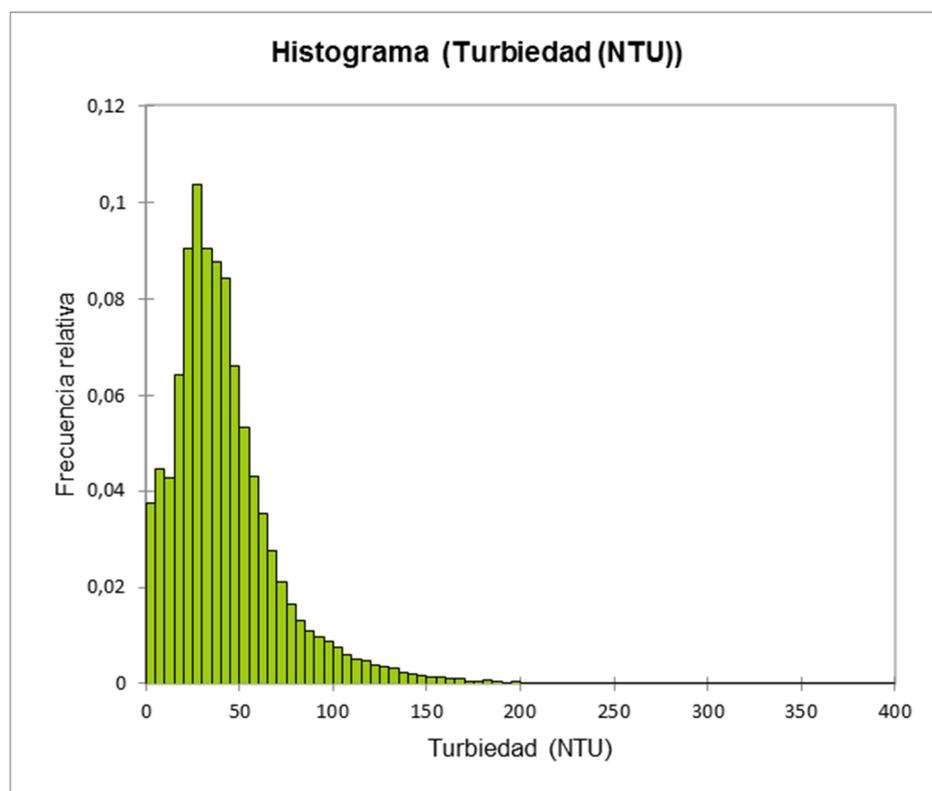


Figura 40: Histograma de los valores de turbiedad (NTU).

7.1.2.2 Salinidad.

La salinidad presentó desde valores prácticamente nulos hasta máximos muy próximos a los 30 psu, mientras que la media fue de 2,15 psu. En la Figura 41 se presenta la serie completa de salinidad medida en continuo y en la Figura 42 el histograma correspondiente a dichos valores.

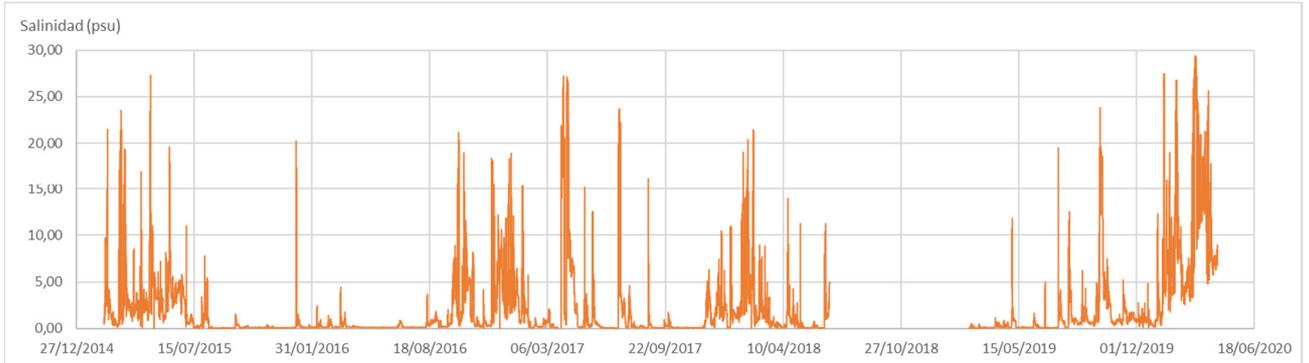


Figura 41: Serie de salinidad (psu) medida en continuo.

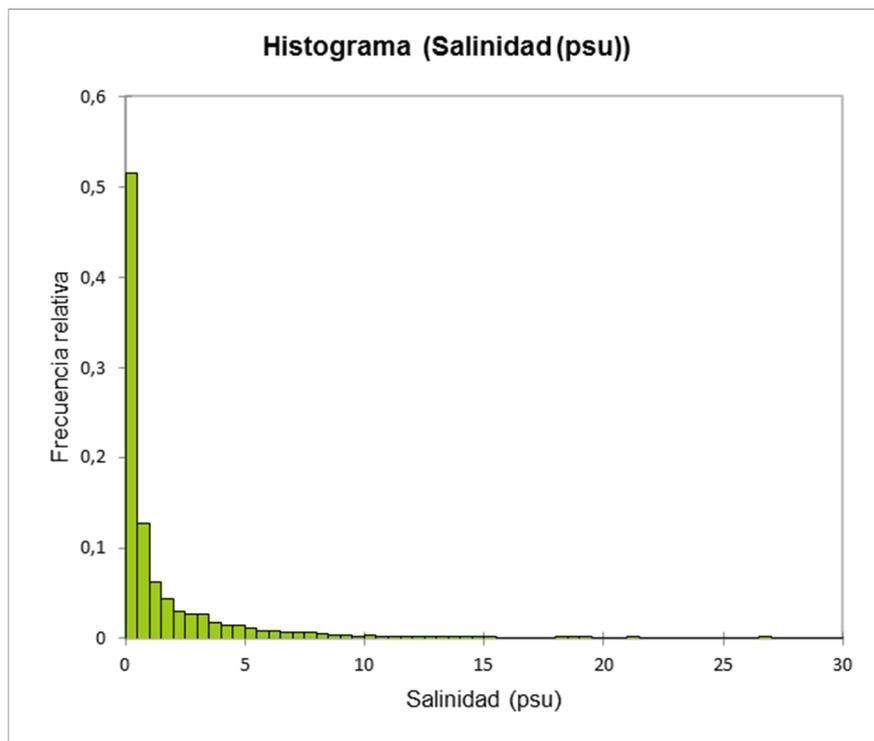


Figura 42: Histograma de los valores de salinidad (psu).

7.1.2.3 Corrientes.

El ADCP registró datos de corriente desde 87 cm del fondo, cada 30 cm, en dos direcciones, Este-Oeste y Norte-Sur. Se optó por considerar el módulo de la corriente, promediado en la vertical, como la corriente media en la columna de agua.

Se registraron datos desde 0 a 0,54 m/s, con un promedio de 0,08 m/s. En el siguiente gráfico (Figura 43) se presenta la serie completa de los valores de corriente y a continuación el histograma correspondiente.

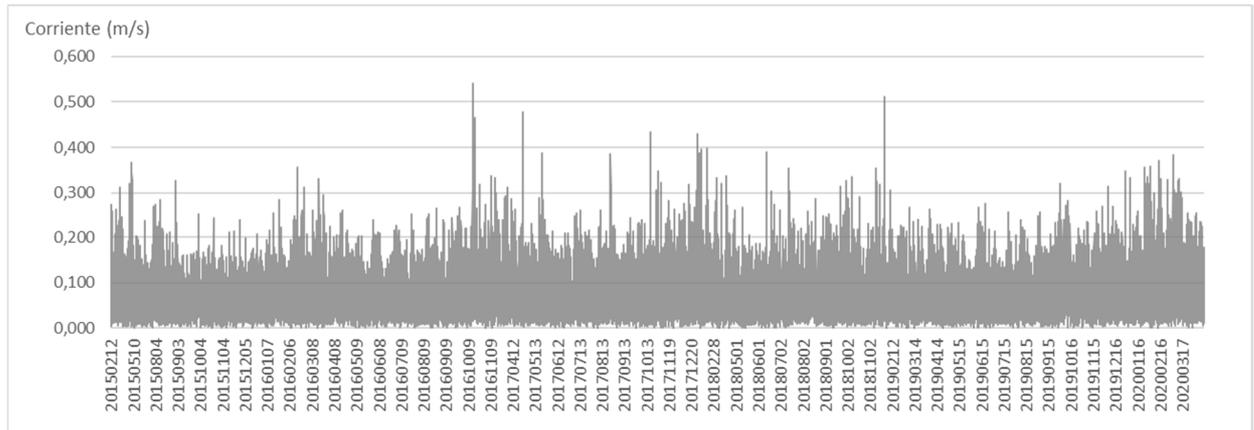


Figura 43: Serie de corriente media (m/s).

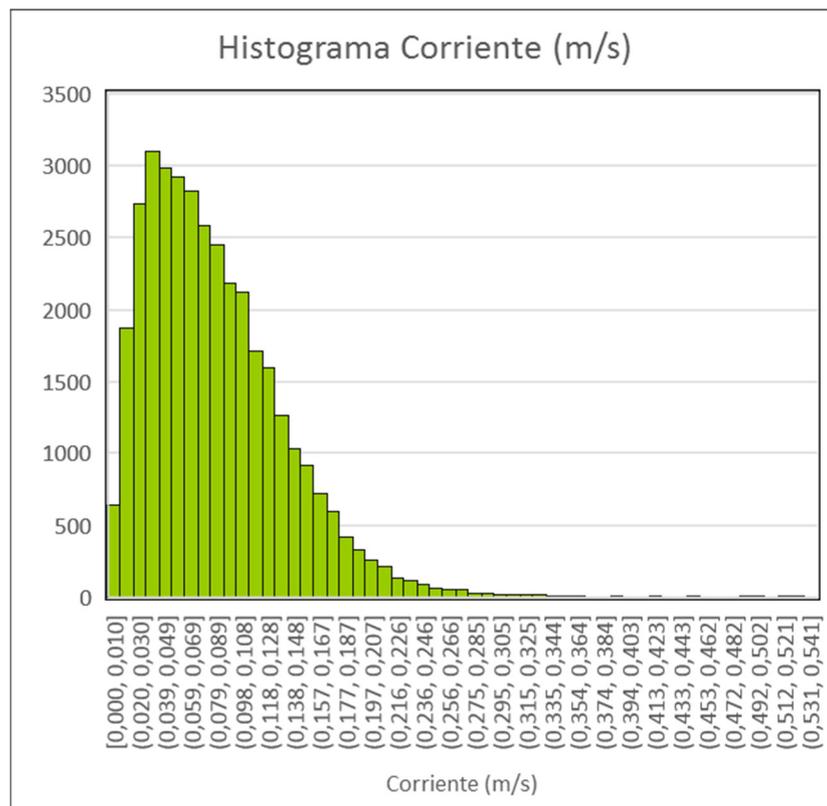


Figura 44: Histograma de corriente media (m/s).

7.1.2.4 Oleaje.

Para la caracterización del oleaje se usaron los parámetros “altura de ola significativa” (H_s) y “periodo cruce por cero” (T_z). La altura de ola significativa presentó valores desde 0,04 m hasta un máximo de 1,74 m, con una media de 0,34 m, mientras que el periodo varió entre 1,3 s y 6 s, con un promedio de 3,0 s. En las siguientes figuras se presentan las series temporales y los histogramas de estas dos variables para todo el periodo.

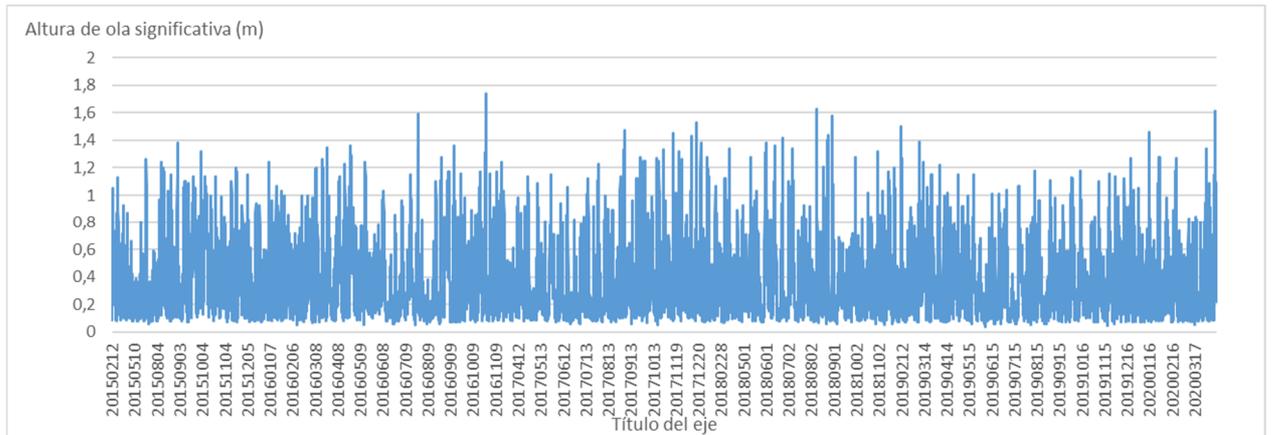


Figura 45: Serie de altura de ola significativa (H_s) en m.

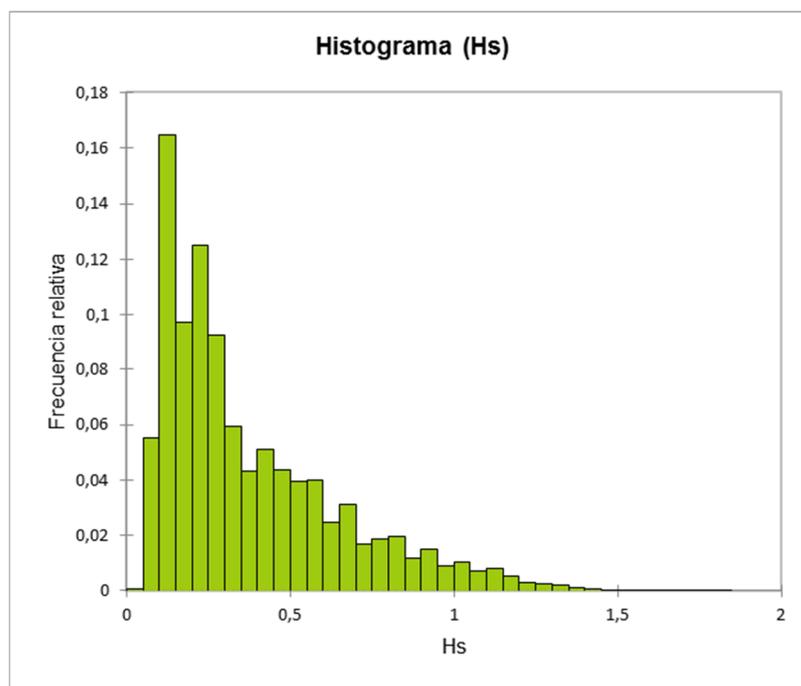


Figura 46: Histograma de altura de ola significativa (H_s) en m

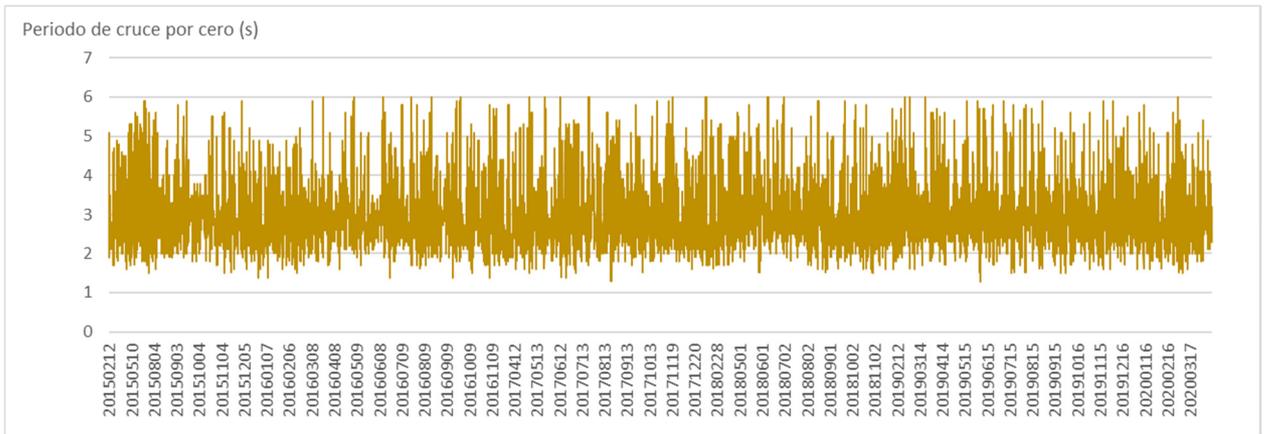


Figura 47: Serie de periodo de cruce por cero (T_z) en s.

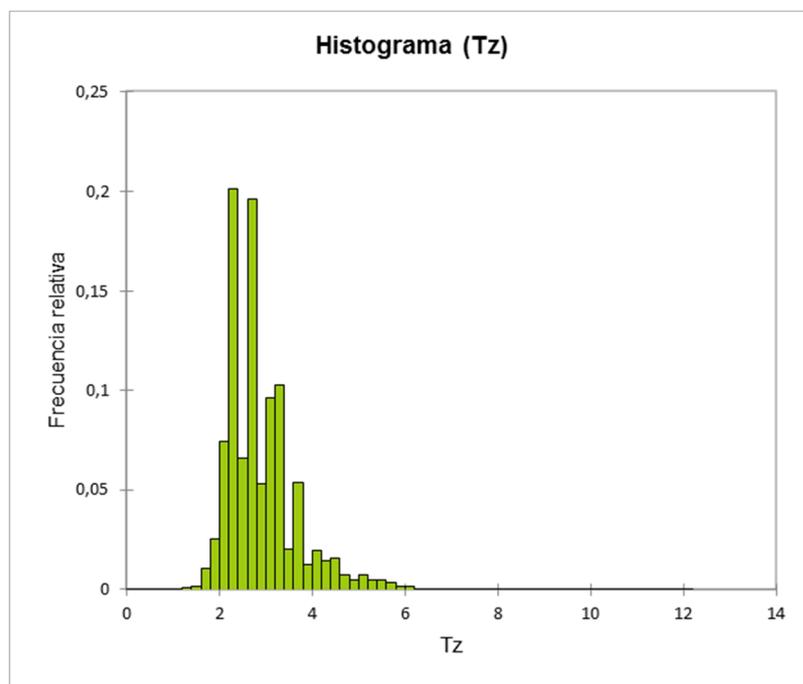


Figura 48: Histograma de periodo de cruce por cero (T_z) en s

7.1.2.5 Efecto combinado de la corriente y el oleaje (V_f).

Debido a que resulta de particular interés estudiar el efecto de las velocidades más próximas al lecho marino, considerando que son las que provocan la resuspensión de los sedimentos, se definió una nueva variable, que llamaremos " V_f " de forma de evaluar el efecto combinado de las corrientes y el oleaje.

Por lo tanto, definiremos la velocidad próxima al fondo según la siguiente ecuación:

$$V_f = \sqrt{C_{ADCP,1}^2 + U_m^2} \quad (Ec. 6)$$

Donde:

V_f es la velocidad cerca del fondo (m/s)

$C_{ADCP,1}$ es el módulo de la corriente de la celda más próxima al lecho del ADCP (m/s)

U_m es la velocidad orbital máxima sobre el lecho, generada por el oleaje (m/s)

Resuspensión de sedimentos por una obra de dragado en el Río de la Plata.

Caso: Central de Ciclo Combinado (UTE), Punta del Tigre, San José.

Según lo descrito por Clifton y Dingler (1984) mientras una ola se traslada por la superficie, pone en movimiento las partículas de agua, siendo la velocidad de esas partículas un parámetro crítico sobre el umbral de movimiento de las partículas de sedimento del fondo, de acuerdo al esquema presentado en la Figura 49. Dicha velocidad depende de la magnitud del diámetro orbital (d_o) generado por la ola y de su periodo (T).

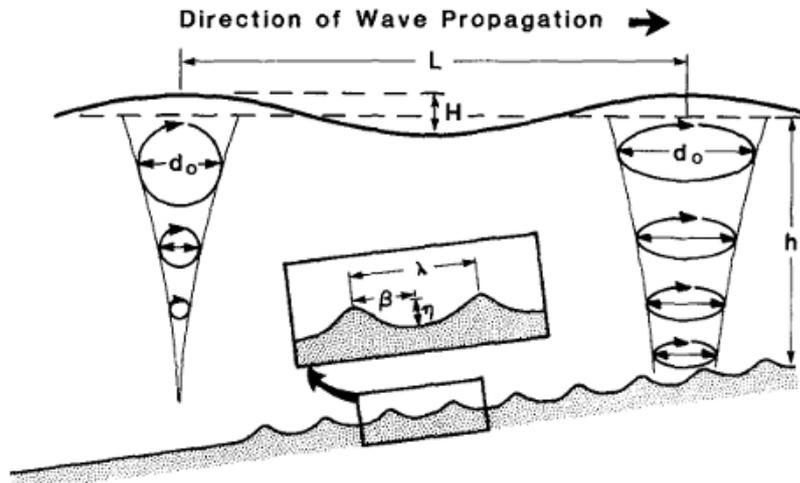


Figura 49: Esquema del movimiento orbital de las partículas de agua asociado al oleaje. Izquierda: aguas profundas, Derecha: aguas someras. (L =longitud de onda, H =altura de la ola, h =profundidad, d_o =distancia máxima horizontal recorrida por las partículas de agua) (Fuente: Clifton y Dingler, 1984).

Según estos autores, una expresión que permite determinar la máxima velocidad orbital es la siguiente:

$$U_m = \frac{\pi d_o}{T} = \frac{\pi H}{T \sinh(kh)} \quad (\text{Ec. 7})$$

Donde

U_m es la velocidad orbital máxima (m/s)

d_o es el diámetro orbital (m)

T es el periodo de la ola (s)

H es la altura significativa de la ola (m)

h es la profundidad del agua (m)

k es el número de onda (m^{-1})

Para determinar el valor del número de onda "k", se utilizó la aproximación propuesta por Fenton y McKee (1990), donde:

$$k = \frac{2\pi}{L} \quad (\text{Ec. 8})$$

$$L = L_o * \left(\tanh \left[\left(2\pi * \frac{\sqrt{h/9.81}}{T} \right)^{\frac{3}{2}} \right] \right)^{2/3} \quad (\text{Ec. 9})$$

$$L_o = \frac{9.81T^2}{2\pi} \quad (Ec. 10)$$

A partir de estas formulaciones se obtuvo el valor de la velocidad orbital (U_m), a la cual se le adicionó la corriente del fondo medida por el ADCP, según lo planteado en la Ec. 6, para obtener el valor de " V_f ". A continuación, se presentan la serie completa y el histograma correspondiente a esta nueva variable.

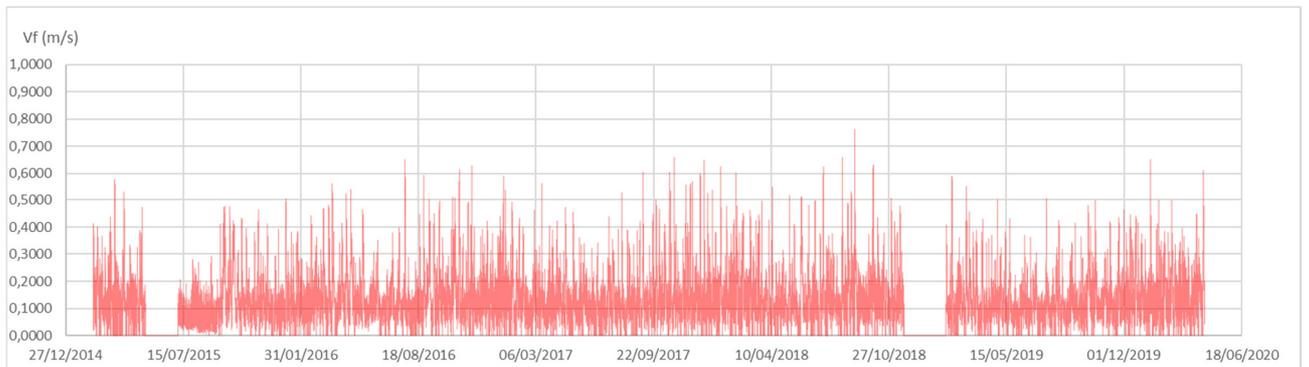


Figura 50: Serie de la velocidad próxima al fondo (V_f) en m/s.

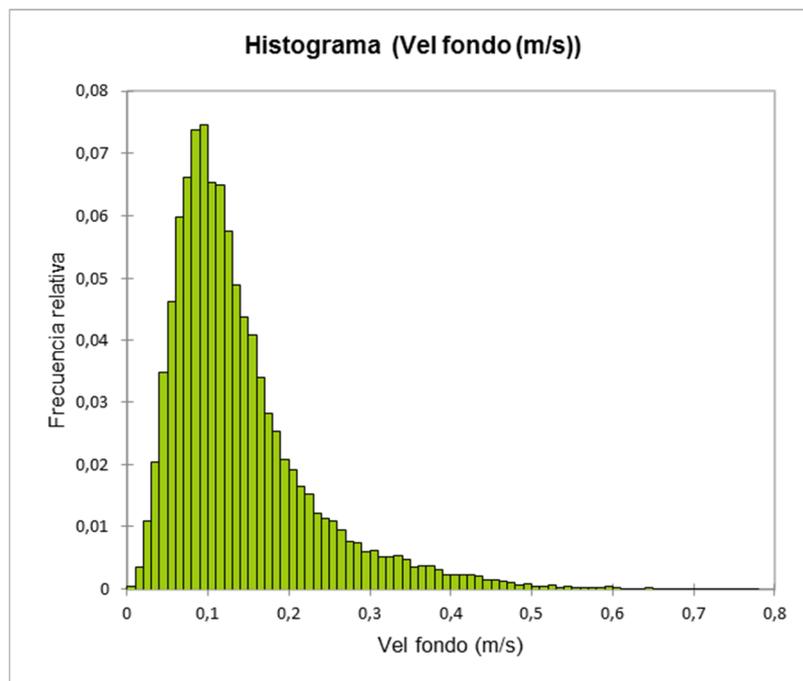


Figura 51: Histograma de la velocidad próxima al fondo (V_f) en m/s.

7.1.2.6 Caudal.

En el periodo analizado, los caudales del RdIP variaron entre 7.619 y 62.930 m³/s, con una media de 27.200 m³/s. En la Figura 52Figura 74 se presenta la serie temporal de caudales y a continuación el histograma correspondiente.

Resuspensión de sedimentos por una obra de dragado en el Río de la Plata.
Caso: Central de Ciclo Combinado (UTE), Punta del Tigre, San José.

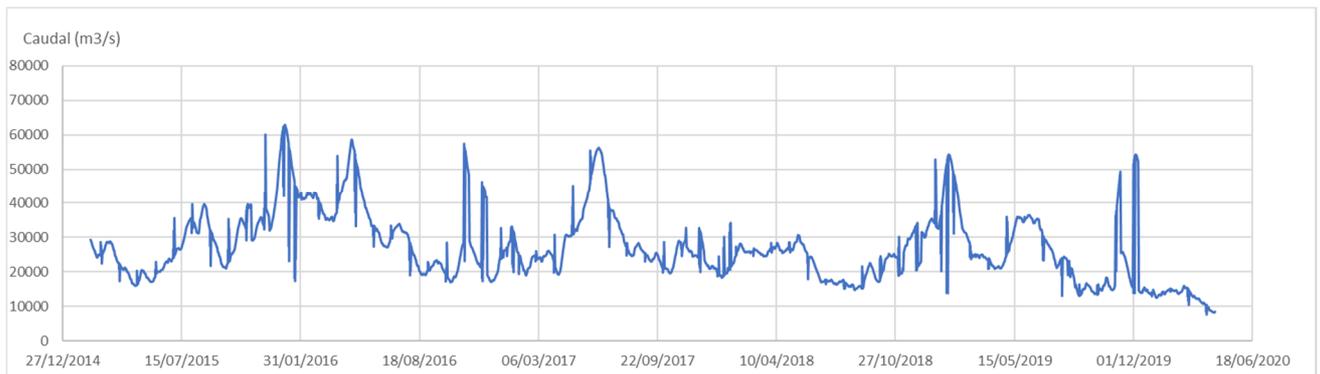


Figura 52: Serie de caudales del Río de la Plata (m³/s).

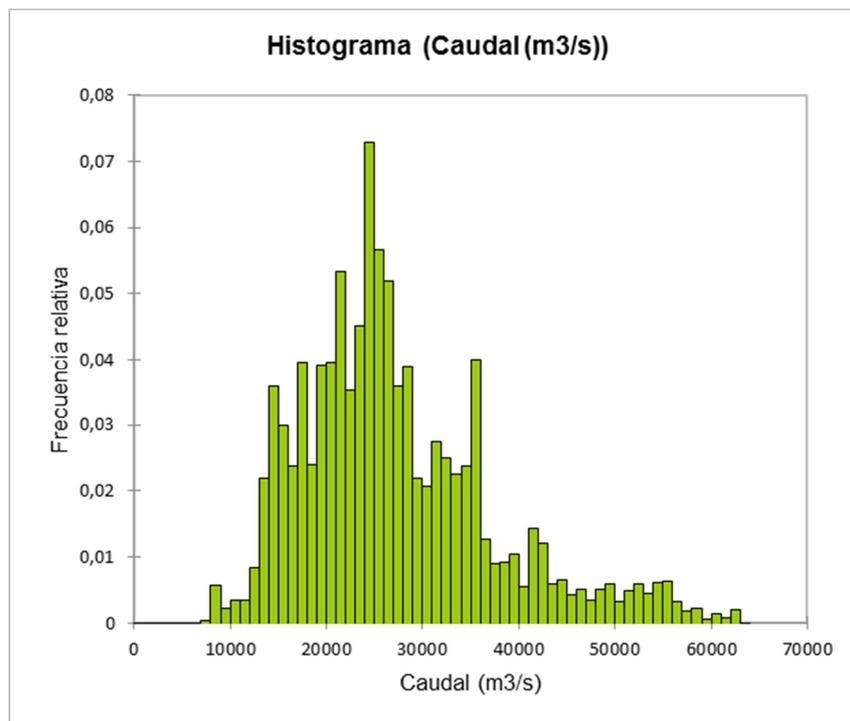


Figura 53: Histograma de caudales del Río de la Plata (m³/s).

7.1.2.7 Temperatura.

En el periodo estudiado la temperatura del RdIP varió entre 7,9 y 31,2 °C en el punto de fondeo, con una media de 18,3 °C. En la Figura 54 se presenta la serie temporal completa del periodo. Como se puede observar, la temperatura mostró un claro comportamiento estacional, siendo la única variable con esta característica. En la Figura 55 se presenta el histograma de distribución de los datos de temperatura.



Figura 54: Serie temporal de temperaturas (°C).

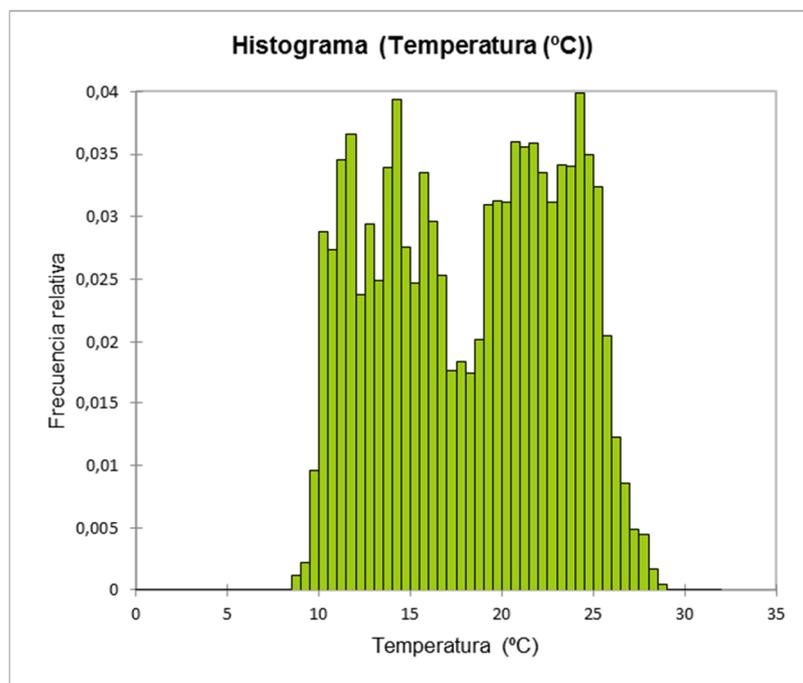


Figura 55: Histograma de temperaturas (°C).

7.2 Análisis de los resultados.

Para obtener algunos de los resultados que se presentan a continuación, fue necesario utilizar algunos métodos de análisis estadístico, para lo cual se utilizó como base la herramienta "XLSTAT" (Addinsoft (2021) - XLSTAT statistical and data analysis solution. New York, USA - <https://www.xlstat.com>).⁶ Antes de presentar los resultados del análisis, se realizará una breve descripción de los métodos estadísticos utilizados, con el objetivo de mostrar para qué se aplica cada uno, en los distintos casos de análisis.

7.2.1 Métodos estadísticos utilizados.

7.2.1.1 Coeficiente de correlación de Pearson.

El coeficiente de correlación de Pearson es un índice que puede utilizarse para medir el grado de correlación entre dos variables, siempre y cuando ambas sean cuantitativas y continuas. Se define de la siguiente forma:

$$\rho_{X,Y} = \frac{\sigma_{XY}}{\sigma_X \sigma_Y} = \frac{Cov(X,Y)}{\sqrt{Var(X) Var(Y)}}$$

Donde:

σ_X = es la desviación estándar de la variable X

σ_Y = es la desviación estándar de la variable Y

σ_{XY} = es la covarianza de (X,Y)

El coeficiente de Pearson toma valores entre 1 y -1. Si es mayor que 0, la correlación es positiva, si es menor a 0, es negativa, y si es igual a 0, se puede decir que no existe una relación lineal entre las variables (puede haber otro tipo de relación). Si el coeficiente es igual a 1 o a -1, se considera que la correlación entre las variables es perfecta, mientras que para valores menores (en valor absoluto) puede considerarse alguna escala como la que se muestra en la Tabla 4.

Tabla 4: Escala de correlaciones en función del coeficiente de Pearson (Cohen, 1988)

Coeficiente de Pearson	Correlación
0 - 0,10	Inexistente / Muy débil
0,10 - 0,29	Débil
0,30 - 0,50	Moderada
0,50 - 1,00	Fuerte

7.2.1.2 Prueba t de Student.

La Prueba "t" de Student se utiliza para saber si las medias de dos muestras (aleatorias e independientes) son significativamente distintas, con cierto nivel de significancia. En otras palabras, saber si dos muestras podrían provenir de la misma población. Para ello se define el estadístico "t", de la siguiente forma:

⁶ Los reportes de cálculo arrojados por la herramienta se presentan en el Apéndice 1

$$t = \frac{x_1 - x_2}{\sqrt{\frac{s_1^2}{N_1} + \frac{s_2^2}{N_2}}}$$

Donde:

x_i = son las medias

s_i^2 = son las varianzas

N_i = son los números de observaciones de cada muestra

En función del valor de t se determina si se debe rechazar o no la hipótesis nula (H_0 : las muestras son estadísticamente iguales).

7.2.1.3 Prueba de Kruskal-Wallis.

La prueba de Kruskal-Wallis es un método no paramétrico (no asume una distribución normal de los datos) para probar si un grupo de muestras independientes provienen de la misma población (son estadísticamente iguales). Esta prueba evalúa si las diferencias entre las medianas entre muestras son estadísticamente significativas, comparando el p-valor con un estadístico "K", definido de la siguiente forma:

$$K = \frac{12}{N(N+1)} \sum_{i=1}^k \frac{R_i^2}{n_i} - 3(N+1)$$

Donde

n_i es el número de observaciones del grupo i

N es la suma de las observaciones de todos los grupos n_i

R_i es la suma de los rangos por grupo i

7.2.1.4 Prueba de Mann-Whitney.

La prueba de Mann-Whitney es una prueba no paramétrica que permite comparar dos muestras independientes, para determinar si las muestras pueden considerarse idénticas o no. Se puede decir que es una versión no paramétrica de la prueba t de Student. Es análoga a la prueba de Kruskal-Wallis cuando $K = 2$.

7.2.1.5 Análisis de Componentes Principales.

El Análisis de Componentes Principales (ACP) consiste en expresar un conjunto de variables en un conjunto de combinaciones lineales de factores no correlacionados entre sí. Estos factores, (también llamados "componentes") se ordenan según la cantidad de la varianza original que describen, lo cual permite representar los datos originales en un espacio de menor dimensión que el original, minimizando la pérdida de información.

El ACP busca la proyección según la cual los datos queden mejor representados en términos de mínimos cuadrados, convirtiendo un conjunto de observaciones de variables (posiblemente correlacionadas) en un conjunto de factores sin correlación lineal, llamados "componentes principales". El objetivo es transformar un conjunto dado de datos "X" de dimensión $n \times m$, a otro conjunto de datos "Y" de menor dimensión $n \times l$ con la menor pérdida de información útil posible, utilizando para ello la matriz de covarianza.

Se parte de un conjunto n de muestras, cada una de las cuales tiene m variables que las describen y el objetivo es que, cada una de esas muestras, se describa con solo l variables, donde $l < m$.

Resuspensión de sedimentos por una obra de dragado en el Río de la Plata.

Caso: Central de Ciclo Combinado (UTE), Punta del Tigre, San José.

El método se basa en la descomposición en vectores propios de la matriz de covarianza. La cual se calcula mediante la siguiente ecuación:

$$\text{cov}(X) = \frac{X^T X}{n - 1}$$
$$\text{cov}(X) P_a = \lambda_a P_a$$

Con

$$\sum_{a=1}^m \lambda_a = 1$$

Donde λ_a es el valor propio asociado al vector propio P_a

Esto se puede entender como que T_a ($T_a = X P_a$) son las proyecciones de X en P_a , donde los valores propios miden la cantidad de varianza “capturada”, es decir, la información que representan cada uno de los componentes principales.

7.2.2 Comparación del monitoreo de turbiedad de obra entre los 4 puntos.

En la Figura 56 se presentan los diagramas de dispersión para la turbiedad entre los 4 puntos de monitoreo. Como se puede observar, existe una fuerte correlación para esta variable entre todos los puntos (coeficientes de Pearson: $p_{12}=0.995$, $p_{13}=0.993$, $p_{14}=0.994$, $p_{23}=0.994$, $p_{24}=0.993$, $p_{34}=0.994$). Así mismo, el resultado de la aplicación de la prueba de Kruskal – Wallis a las series de turbiedad en los 4 puntos, indica que no existe una diferencia estadísticamente significativa entre las muestras.

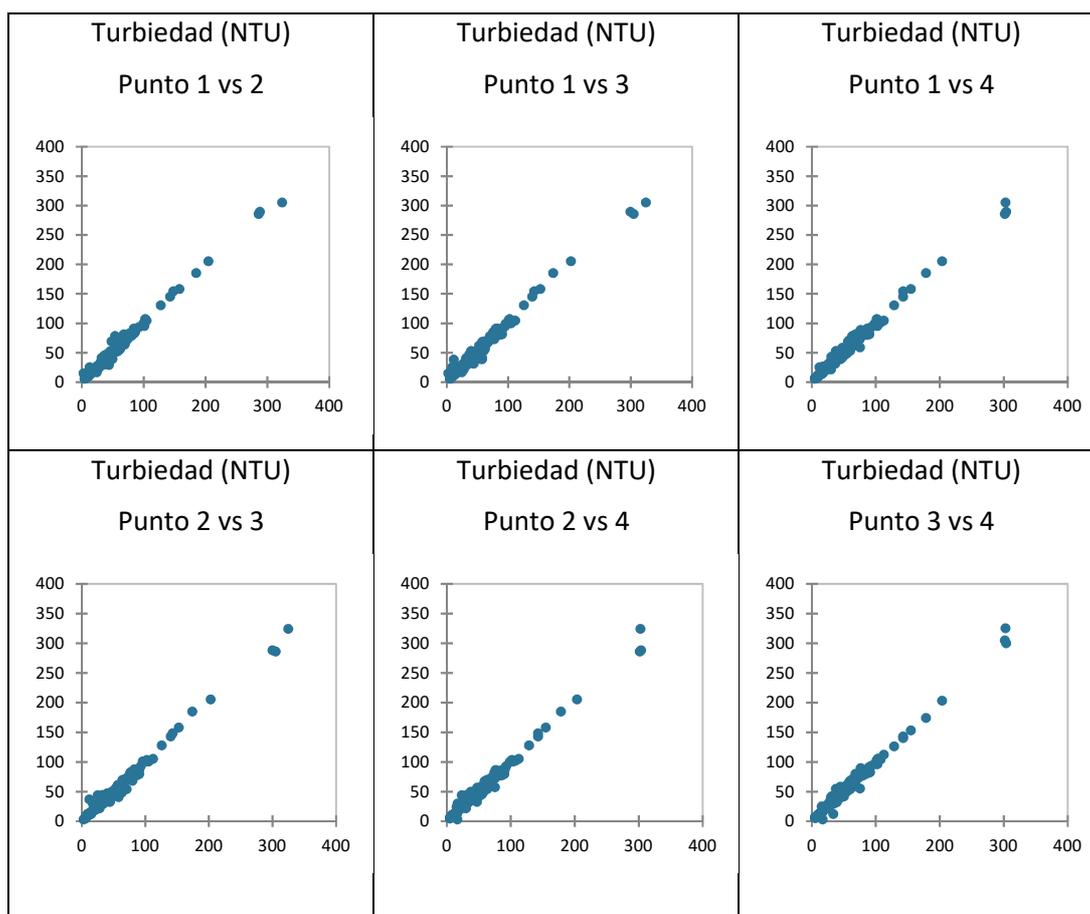


Figura 56: Diagramas de dispersión de las series de turbiedad (NTU) entre los cuatro puntos de monitoreo.

7.2.3 Análisis de cumplimiento del criterio de control ambiental.

En relación al criterio de control ambiental establecido, se observa que el mismo (130 NTU en el promedio móvil de 3 días consecutivos) fue superado 6 veces (ver Tabla 5). Se observa que siempre que se superó este límite, esto sucedió en los cuatro puntos simultáneamente y todas las veces en febrero de 2017. Estos seis registros corresponden a un 2% del total de los registros obtenidos durante el monitoreo de obra.

Tabla 5: Registro de superaciones del límite establecido, para cada punto de monitoreo. Los valores corresponden al promedio del día de la fecha que se indica y los dos anteriores.

	Punto 1	Punto 2	Punto 3	Punto 4
08/02/2017	197	203	210	202
09/02/2017	293	299	310	303
10/02/2017	260	260	269	270
11/02/2017	165	164	168	169
18/02/2017	166	164	157	159
19/02/2017	140	136	133	133

Resuspensión de sedimentos por una obra de dragado en el Río de la Plata.

Caso: Central de Ciclo Combinado (UTE), Punta del Tigre, San José.

El siguiente gráfico (Figura 57) muestra la serie de turbiedad monitoreada durante la obra, destacando el límite de 130 NTU (línea roja) y los valores de profundidad de Disco Secchi en cm (cada punto del gráfico corresponde al promedio de los valores registrados en los 4 puntos de monitoreo). Se aclara que solo se estableció un límite para la turbiedad y no para los valores de profundidad de Disco Secchi.



Figura 57: Monitoreo de control de obra (Turbiedad en color azul, Profundidad de Disco Secchi en color verde, la línea horizontal roja corresponde al valor de 130 NTU).

7.2.4 Correlación entre las mediciones de turbiedad y de profundidad de Disco Secchi.

Los datos obtenidos permitieron analizar la correlación existente entre los dos métodos utilizados, la turbiedad y la profundidad de Disco Secchi. La Figura 58 presenta la distribución de los valores de turbiedad en relación al inverso de la profundidad, para cada uno de los puntos. En la Figura 59 se presenta la misma relación pero en escalas logarítmicas, para una mejor visualización de la correlación. En el mismo gráfico se presenta la curva de tendencia obtenida (lineal, con $R^2 = 0,57$).

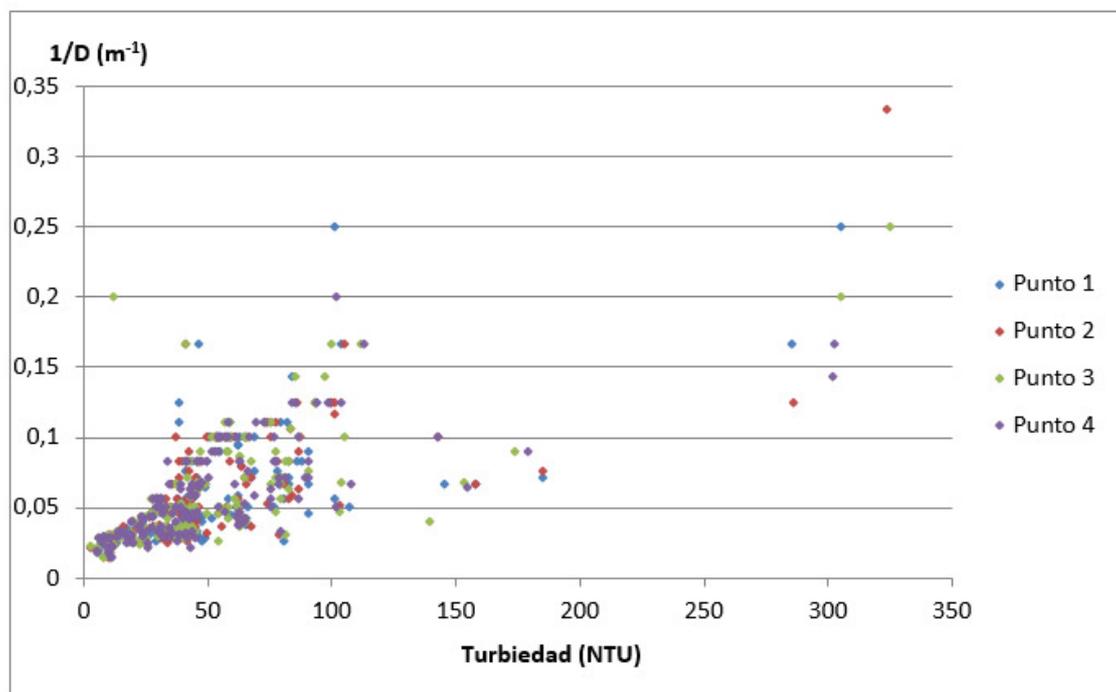


Figura 58: Diagrama de dispersión de los valores de turbiedad medidos con turbidímetro y el inverso de la profundidad medida con Disco Secchi, en los cuatro puntos de monitoreo de control de obra.

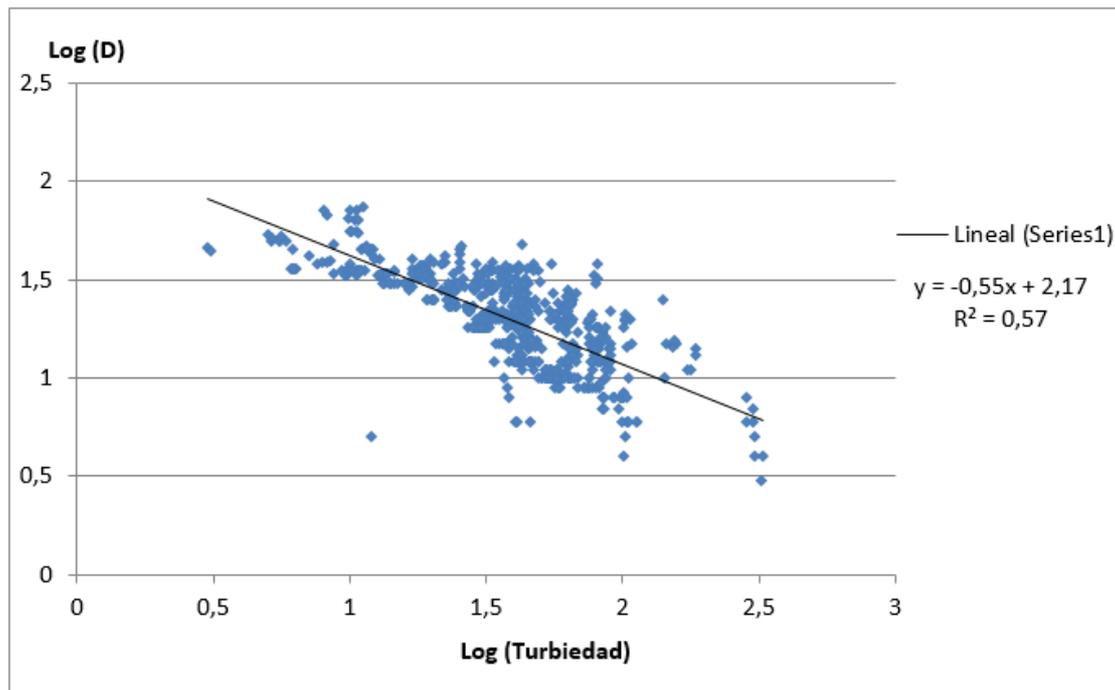


Figura 59: Correlación entre log (turbiedad) de los valores medidos con turbidímetro y log (D) de la profundidad medida con Disco Secchi. Se presenta la correlación lineal obtenida.

7.2.5 Comparación de la turbiedad entre el monitoreo de obra y el realizado por UdelaR.

Se realizó una comparación de los resultados de turbiedad de ambos monitoreos. En la Figura 60 se presenta la serie completa del monitoreo continuo y los valores obtenidos durante el monitoreo de obra (cada punto naranja corresponde al promedio de lo medido en cada uno de los 4 puntos). Se identifica un periodo, entre noviembre de 2016 y marzo de 2017, en que no fue posible la comparación debido a la ausencia de datos del monitoreo continuo. Ese periodo coincidió con un pico de turbiedad registrado por el monitoreo de obra, que alcanzó 325 NTU.

En la siguiente tabla (Tabla 6) se presenta la comparación entre las medias, máximos y mínimos registrados por cada monitoreo.

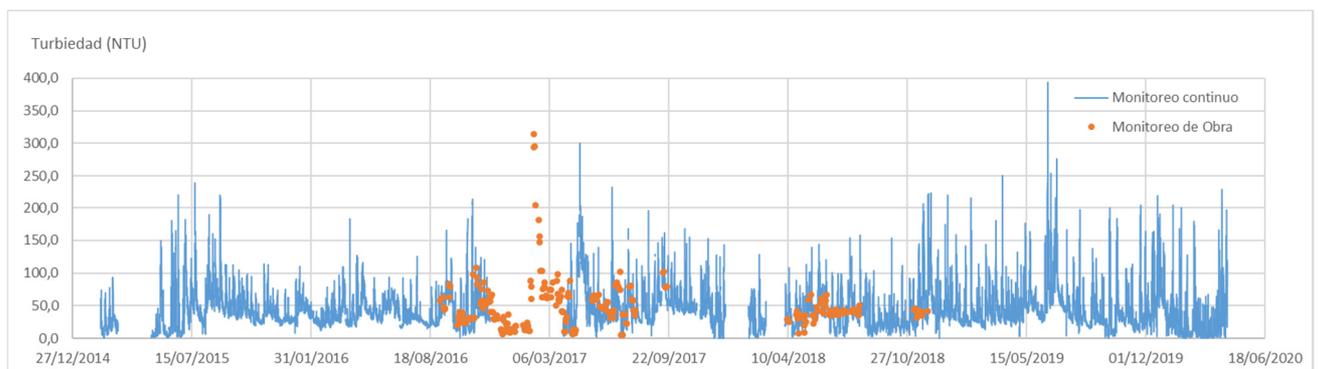


Figura 60: Serie de turbiedad (NTU) medida en continuo (línea azul) y registros del monitoreo de obra (puntos anaranjados).

Resuspensión de sedimentos por una obra de dragado en el Río de la Plata.

Caso: Central de Ciclo Combinado (UTE), Punta del Tigre, San José.

Tabla 6: Resultados de la medición continua de turbiedad en comparación con el monitoreo de obra.

Turbiedad (NTU)	Medición continua	Monitoreo de obra
Media	44.6	48.9
Máximo	394	325
Mínimo	0.0	3.0

Se destaca que, mientras que el equipo de medición continua tomaba muestras a unos 85 cm del fondo, las muestras del monitoreo de obra eran tomadas aproximadamente a media columna de agua (en el punto de muestreo continuo, la profundidad varió entre 2,4 m y 5,9 m, con una media de aproximadamente 4 m). A pesar de esta diferencia, se considera que la mayor parte del tiempo estos valores son comparables, ya que se ha observado que la columna de agua se encuentra en general bien mezclada, sin estratificación (IMFIA, 2016).

En la siguiente figura (Figura 61) se presenta la correlación entre los valores de turbiedad obtenidos por ambos monitoreos. Se aclara que cada punto graficado corresponde a lo siguiente:

- Registros en que existen valores para ambos monitoreos.
- Monitoreo de obra: promedio de los 4 puntos.
- Monitoreo continuo: promedio entre las 12:00hs y las 14:00 hs.

Se presenta la curva de tendencia obtenida (lineal, con $R^2 = 1$) y una banda de tolerancia de 20 NTU, dentro de la cual quedan contenidas el 80% de las observaciones. A pesar de que se obtuvo un buen resultado para la línea de tendencia, se puede apreciar una gran dispersión de los datos.

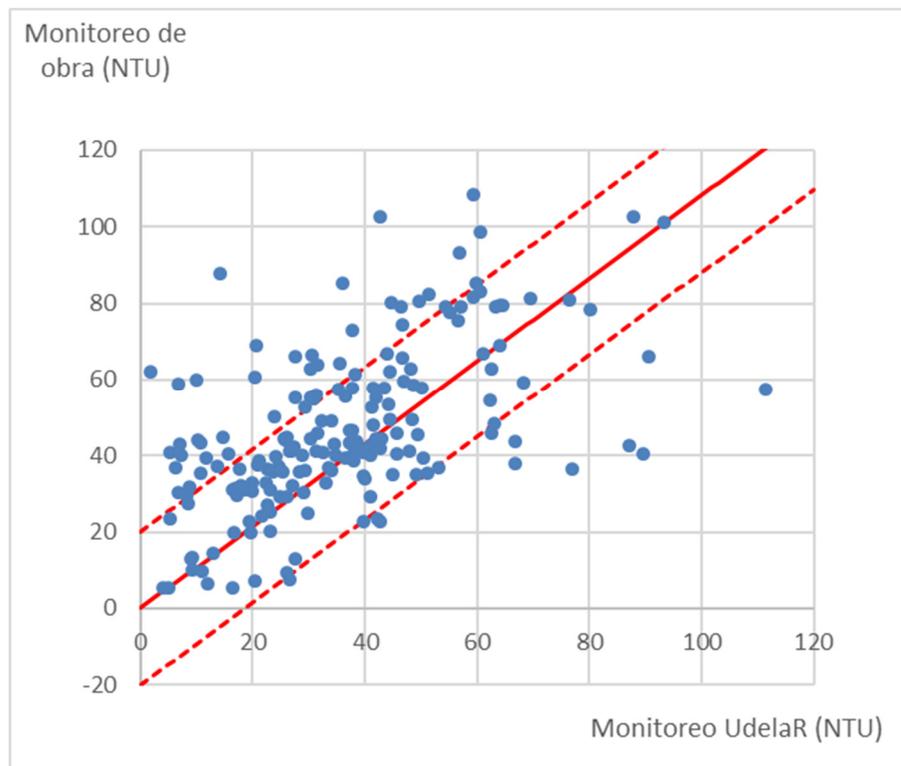


Figura 61: Dispersión de los datos de turbiedad para el periodo de obra, entre los datos del monitoreo discreto (promedio de los 4 puntos) y el monitoreo continuo (promedio entre las 12:00 y 14:00 hs).

7.2.6 Relación entre la turbiedad y otras variables.

En este apartado se presenta el análisis de la relación de la turbiedad con las demás variables. Dicho análisis se realizó con el objetivo de profundizar en el conocimiento de los procesos naturales del RdIP en la zona de Punta del Tigre y cómo las variaciones en las distintas variables influyen sobre la turbiedad. Se entiende que las variables que pueden tener una relación directa con la turbiedad son: la salinidad, la corriente, el caudal (del Río de la Plata) y, de forma indirecta, la temperatura.

La salinidad suele tener una fuerte influencia sobre los sólidos en suspensión, y por lo tanto sobre la turbiedad, debido a efectos de coagulación y floculación, mientras que caudal del Río de la Plata, no solo representa la principal fuente de los mismos, sino que juega un papel significativo sobre la ubicación de la cuña salina. La temperatura en principio no tendría un efecto directo sobre la turbiedad, pero es la única variable que tiene un marcado ciclo estacional, por lo que puede estar relacionada indirectamente, debido a cambios estacionales de los caudales y por lo tanto de la ubicación de la cuña salina. La temperatura también influye en la actividad biológica, en particular el crecimiento algal, lo cual puede afectar las mediciones de turbiedad. Por su parte, las corrientes (tanto por efecto del oleaje como de las mareas) son capaces de resuspender y transportar sedimentos, lo cual puede ser un factor determinante en las variaciones de turbiedad en un cuerpo de agua con las características del RdIP.

7.2.6.1 Relación de la turbiedad con la salinidad.

En el siguiente gráfico (Figura 62) se presentan las series de los valores de turbiedad y salinidad, junto con los resultados del monitoreo de obra. A su vez se realizó el diagrama de dispersión entre la turbiedad y la salinidad, el que se presenta en la (Figura 63).

Resuspensión de sedimentos por una obra de dragado en el Río de la Plata.
Caso: Central de Ciclo Combinado (UTE), Punta del Tigre, San José.

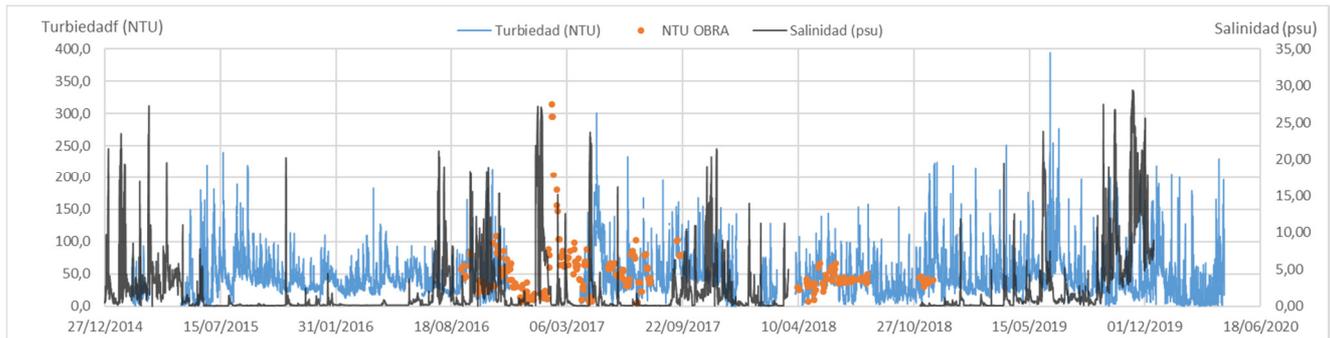


Figura 62: Serie de turbiedad medida en continuo (línea azul), monitoreo de obra (puntos anaranjados) y serie de salinidad (línea negra).

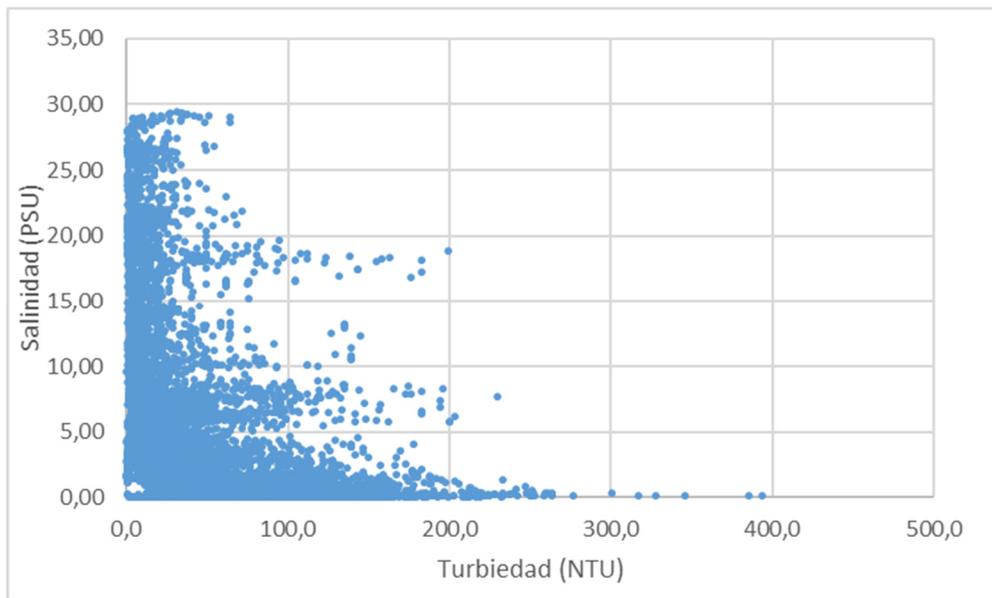


Figura 63: Diagrama de dispersión entre Turbiedad (NTU) y Salinidad (psu).

Del diagrama de dispersión se desprende que existe una relación negativa, aunque no muy marcada, existiendo valores de turbiedad relativamente altos (mayores a 100 NTU) para salinidades de entre 15 y 20 psu. El coeficiente de Pearson resultó ser de $-0,267$ (correlación débil).

Teniendo en cuenta la observación anterior, se graficó la misma dispersión en escalas logarítmicas para observar mejor dicho comportamiento (Figura 64). Como se puede apreciar, para valores de salinidad menores a 1 psu, los valores de turbiedad se encuentran por encima de 10 NTU.

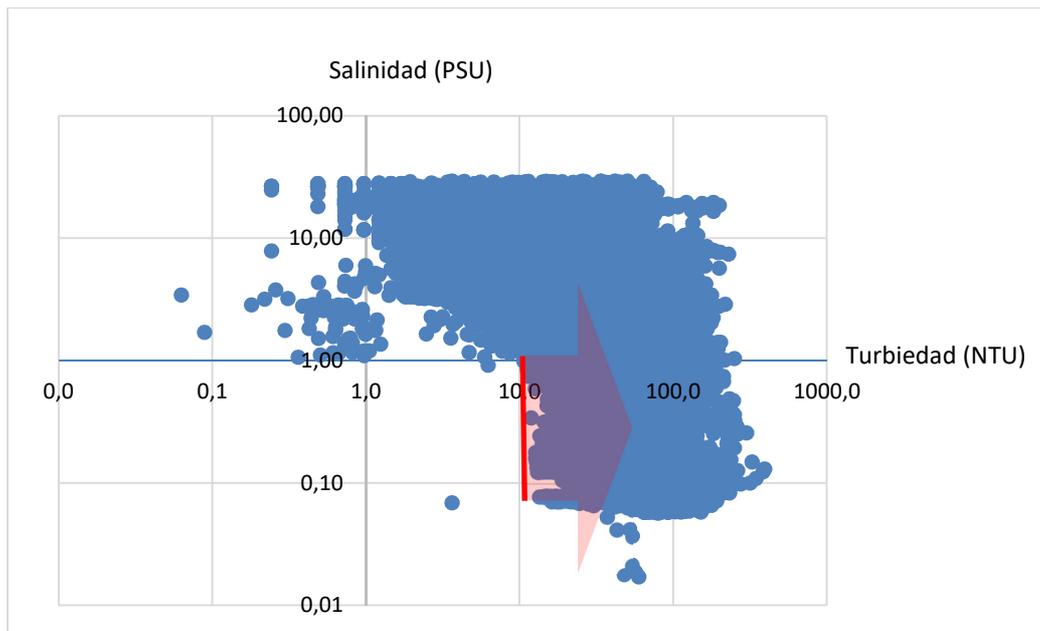


Figura 64: Diagrama de dispersión entre los valores de turbiedad y salinidad en escala logarítmica.

Para evaluar el comportamiento general del sistema para ambas situaciones, se aplicó un ACP a ambos grupos de observaciones (mayores y menores a 1 psu), cuyos resultados se presentan en la Figura 65.

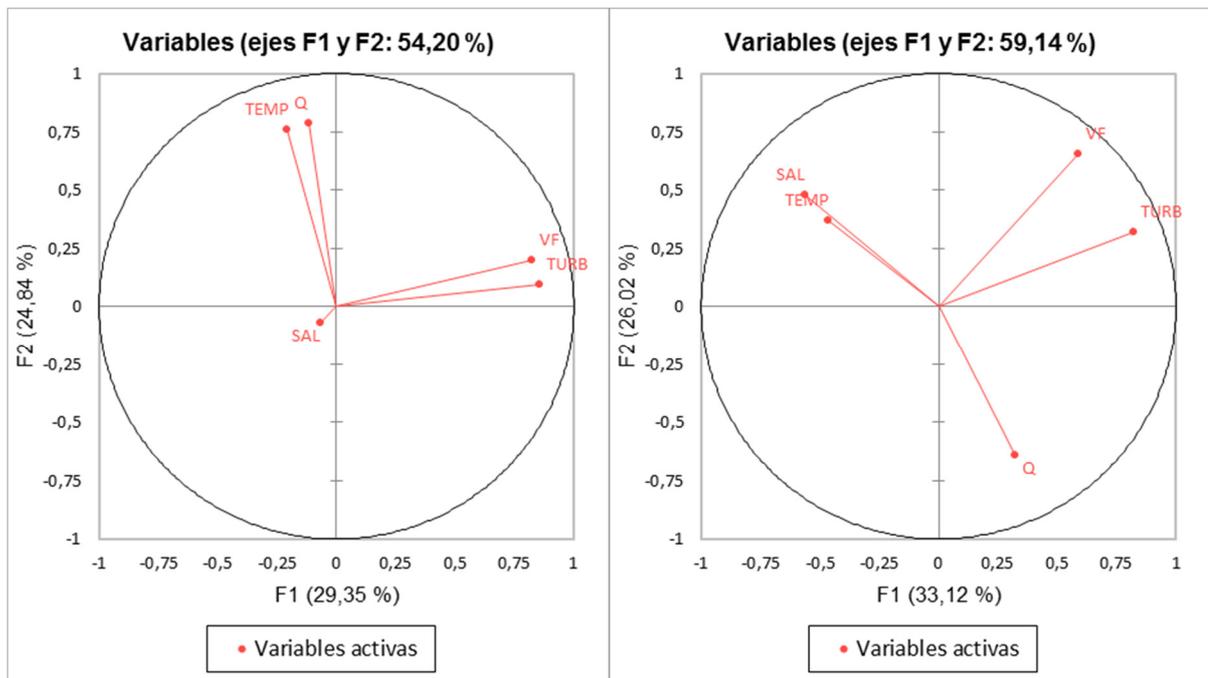


Figura 65: Análisis de Componentes Principales para las observaciones con baja salinidad (izquierda) y con alta salinidad (derecha).

Para el grupo de baja salinidad, se observa que la misma no se relaciona de forma significativa con ninguna otra variable (obsérvese lo pequeño de su módulo), mientras que las variables caudal y temperatura se encuentran fuertemente relacionadas entre sí, al igual que la velocidad cercana al fondo con la turbiedad. También se observa que estos dos pares de variables parecen muy poco relacionados entre sí.

Resuspensión de sedimentos por una obra de dragado en el Río de la Plata.

Caso: Central de Ciclo Combinado (UTE), Punta del Tigre, San José.

Para el grupo de alta salinidad se observa un comportamiento algo distinto. Aunque la turbiedad sigue estando relacionada positivamente con la velocidad próxima al fondo (aunque en menor medida, ya que se observa cierto desacople de los vectores), también aparece una leve correlación negativa con la salinidad y la temperatura. Por otro lado, se destaca que la correlación entre la temperatura y el caudal cambia de signo y que aparece una correlación negativa fuerte entre el caudal y la salinidad.

En vista de estos resultados, se analizó el efecto de la salinidad en la relación entre la turbiedad y la profundidad de disco Secchi, medidas durante el monitoreo de obra (ver apartado 7.2.4). Sobre el mismo gráfico de la Figura 59 se destacaron en color rojo los valores cuya salinidad superan 1 psu, lo cual se puede apreciar en la siguiente figura (Figura 66).

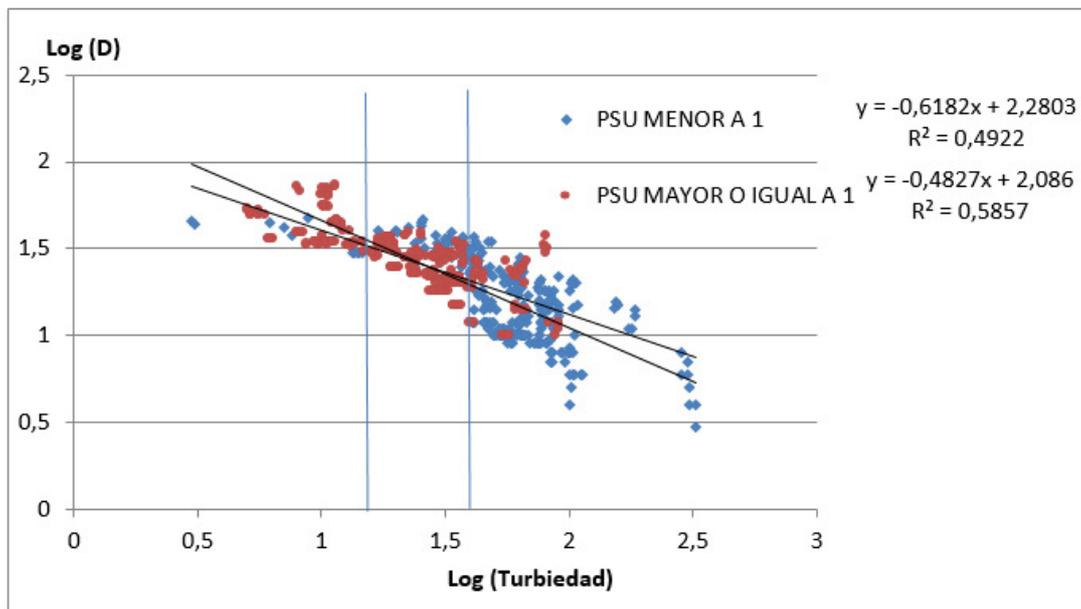


Figura 66: Correlación entre log (Turbiedad) de los valores medidos con turbidímetro y log (D) de la profundidad medida con Disco Secchi. Se presentan en color rojo las observaciones correspondientes a valores de salinidad mayores o iguales a 1 PSU y en azul las observaciones correspondientes a valores de salinidad menores a 1 PSU.

De este análisis se puede destacar que:

- Para salinidades mayores que 1 psu no hay registros de turbiedad por encima de 100 NTU.
- Para las observaciones con salinidad menor a 1 psu, la línea de tendencia presenta una pendiente mayor

Existe una zona media (aproximadamente entre 20 y 40 NTU) en que las observaciones con salinidad mayor a 1 psu, se encuentran por debajo de los valores con menor salinidad. O sea, para el mismo nivel de turbiedad, presentan una menor profundidad de Disco Secchi.

7.2.6.2 Relación con la corriente.

En el siguiente gráfico (Figura 67) se presentan las series de los valores de turbiedad y el módulo de la corriente media, junto con los resultados del monitoreo de obra. La correlación entre la turbiedad y el módulo de la corriente media resultó ser prácticamente inexistente, como se aprecia en la Figura 68, con un coeficiente de Pearson de 0,060.

Resuspensión de sedimentos por una obra de dragado en el Río de la Plata.

Caso: Central de Ciclo Combinado (UTE), Punta del Tigre, San José.

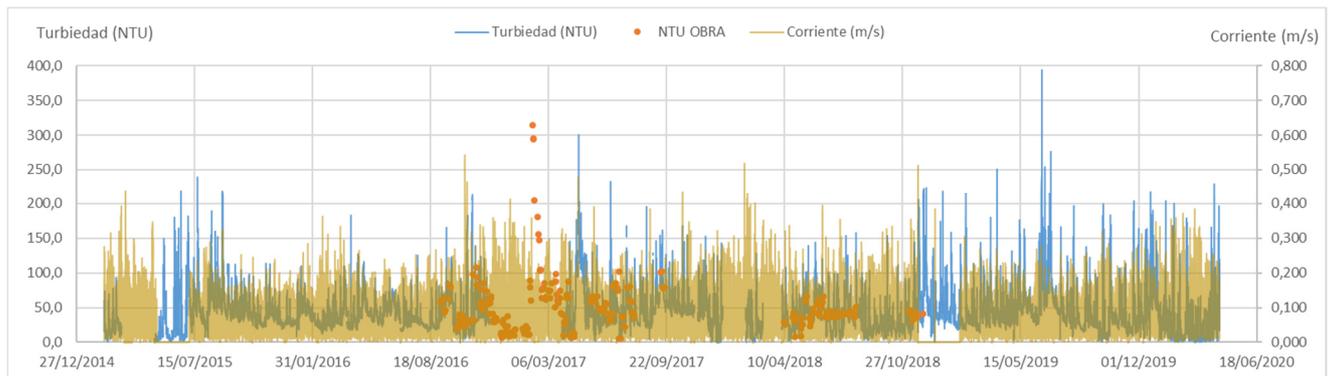


Figura 67: Serie de turbiedad medida en continuo (línea azul), monitoreo de obra (puntos anaranjados) y serie de corriente media (línea marrón).

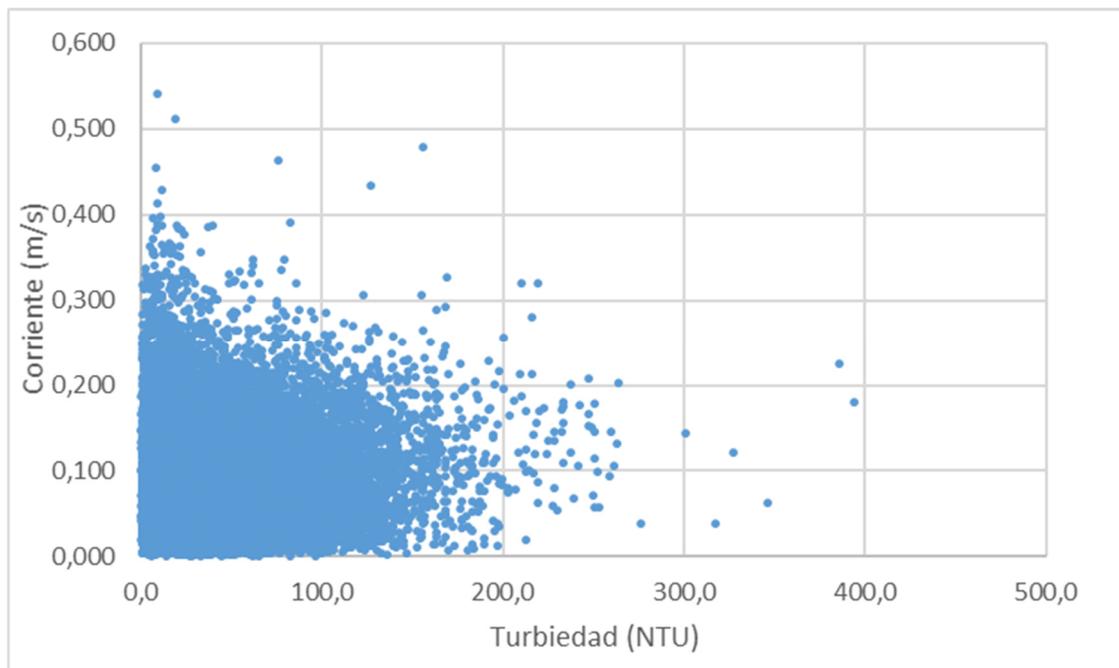


Figura 68: Diagrama de dispersión entre Turbiedad (NTU) y el módulo de la corriente media (m/s)

7.2.6.3 Relación con el oleaje.

Se analizó la relación de la turbiedad con el oleaje, considerando las variables altura de ola significativa y periodo de cruce por cero. En las Figura 69 y Figura 70, se presentan los diagramas de dispersión de la turbiedad con dichas variables.

En la Figura 69 se puede observar que, aunque se aprecia una dispersión importante de las observaciones, existe una correlación positiva relativamente fuerte (coef. de Pearson 0,515), mientras que no sucede lo mismo con el periodo, con el cual se aprecia una correlación débil (coef. Pearson 0,118), tal como se observa en la Figura 70.

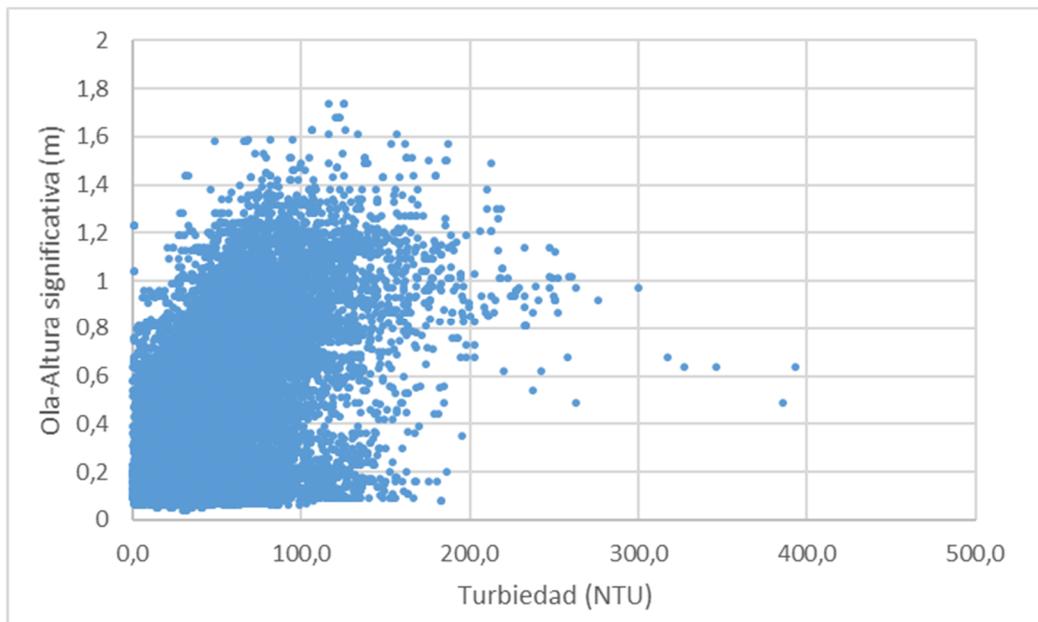


Figura 69: Diagrama de dispersión entre Turbiedad (NTU) y la altura de ola significativa (m)

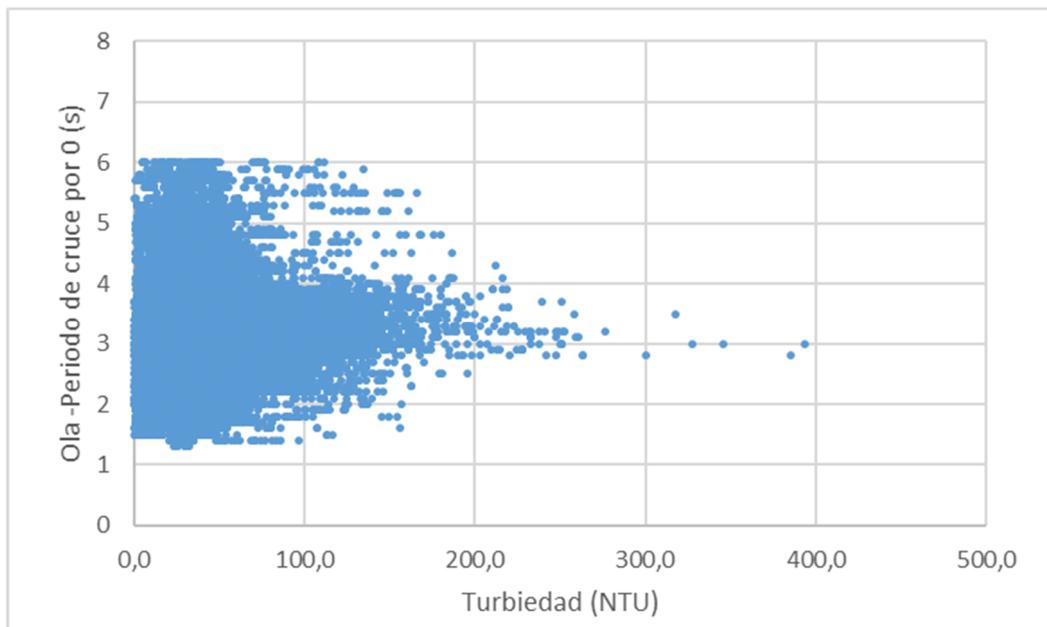


Figura 70: Diagrama de dispersión entre Turbiedad (NTU) y el periodo de cruce por cero (s)

7.2.6.4 Relación con la velocidad cerca del fondo " V_f ".

En el Figura 71 se presenta el diagrama de dispersión entre la turbiedad y la nueva variable " V_f ", mientras que en la Figura 72 se presenta la serie temporal de turbiedad medida en continuo (línea azul), monitoreo de obra (puntos anaranjados) y serie de " V_f " (línea roja). Aunque se observa una correlación positiva, la misma resulta moderada (coef. de Pearson = 0,430) y se observa que la mayoría de los valores de turbiedad más altos, no se corresponden con los valores altos de esta nueva variable.

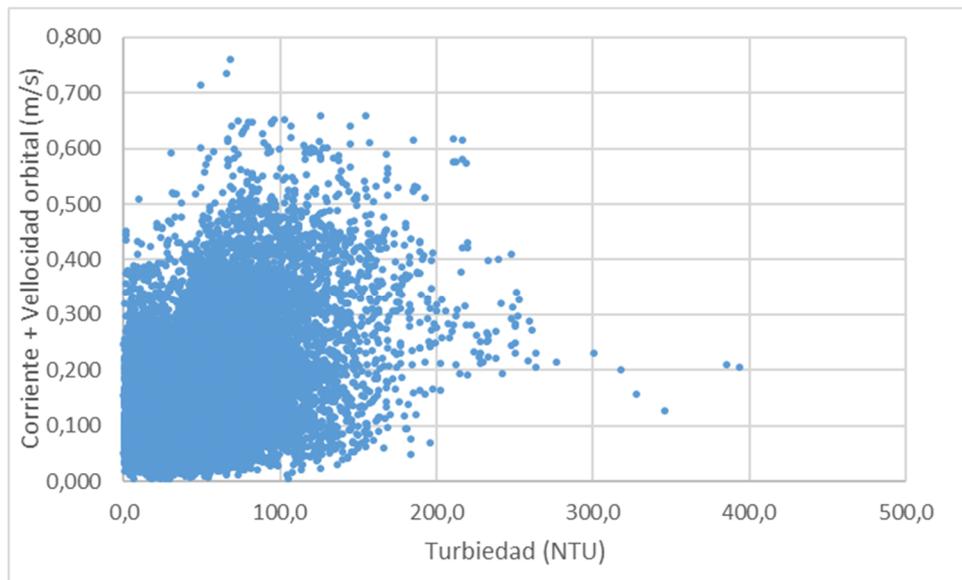


Figura 71: Diagrama de dispersión entre Turbiedad (NTU) y la velocidad combinada próxima al fondo (m/s)

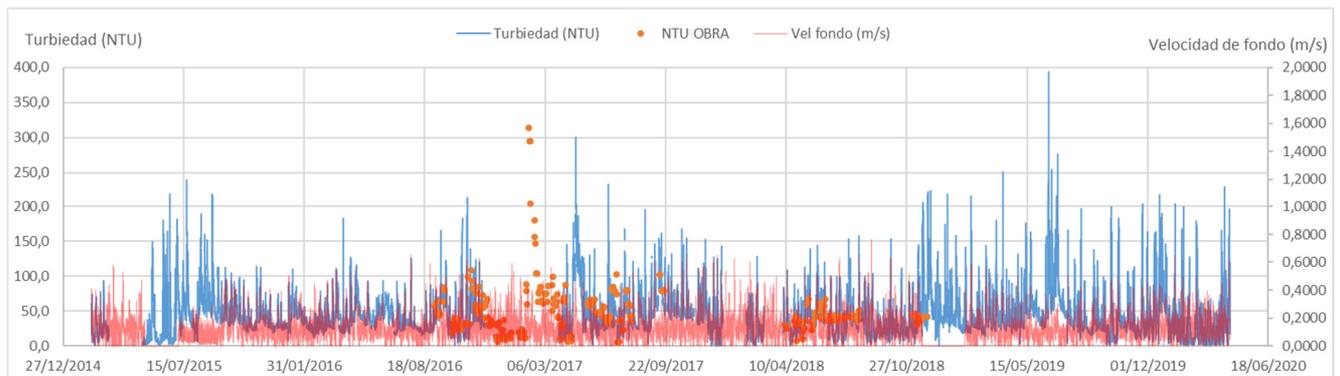


Figura 72: Serie de turbiedad medida en continuo (línea azul), monitoreo de obra (puntos anaranjados) y serie de " V_f " (línea roja).

En la Figura 73 se presenta el resultado de un nuevo ACP, en esta oportunidad realizado para el paquete de variables originales (izquierda) y sustituyendo las variables: corriente, profundidad, altura de ola significativa y periodo de ola, por la nueva variable " V_f " (derecha). Se puede observar que esta sustitución de variables no solo permite simplificar el análisis de las correlaciones, debido a la reducción de su número, sino que además se obtiene un aumento en el porcentaje de la varianza total explicada por los dos primeros factores del ACP, de 45% a casi 58%.

Resuspensión de sedimentos por una obra de dragado en el Río de la Plata.

Caso: Central de Ciclo Combinado (UTE), Punta del Tigre, San José.

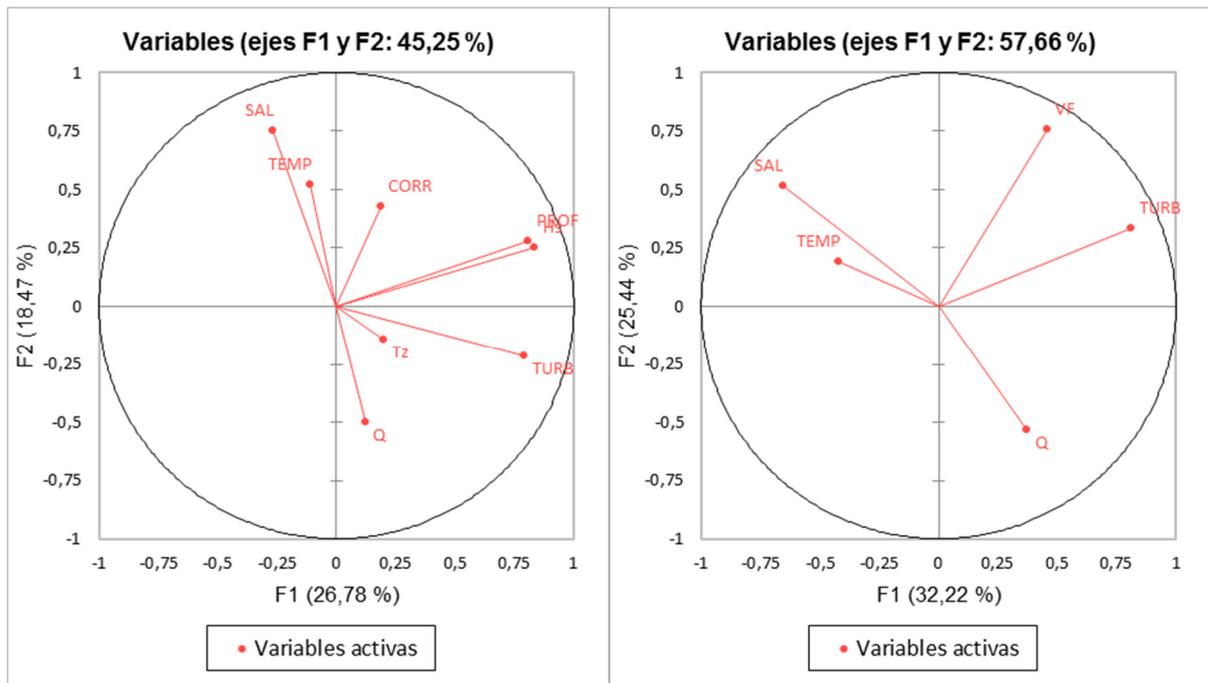


Figura 73: Análisis de Componentes Principales. Izquierda: variables originales, Derecha: sustituyendo las variables: corriente (CORR), profundidad (PROF) y altura y periodo de ola (Hs y Tz), por "V_f" (VF).

7.2.6.5 Relación con el caudal del Río de la Plata.

En la Figura 74 se presenta la serie temporal de turbiedad medida en continuo (línea azul), el monitoreo de obra (puntos anaranjados) y la serie de caudales del RdIP (línea negra), mientras que en la Figura 75 se presenta el diagrama de dispersión entre la turbiedad y el caudal. La correlación entre estas variables resultó ser débil (coef. de Pearson = 0,116), aunque se aprecia un aumento de los valores mínimos de Turbiedad a medida que los caudales aumentan.

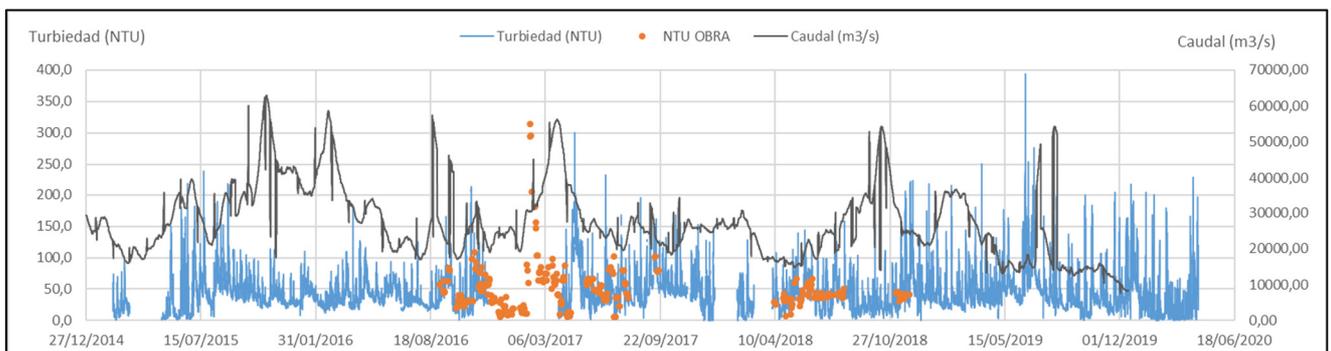


Figura 74: Serie de turbiedad medida en continuo (línea azul), monitoreo de obra (puntos anaranjados) y serie de caudales del Río de la Plata (línea negra).

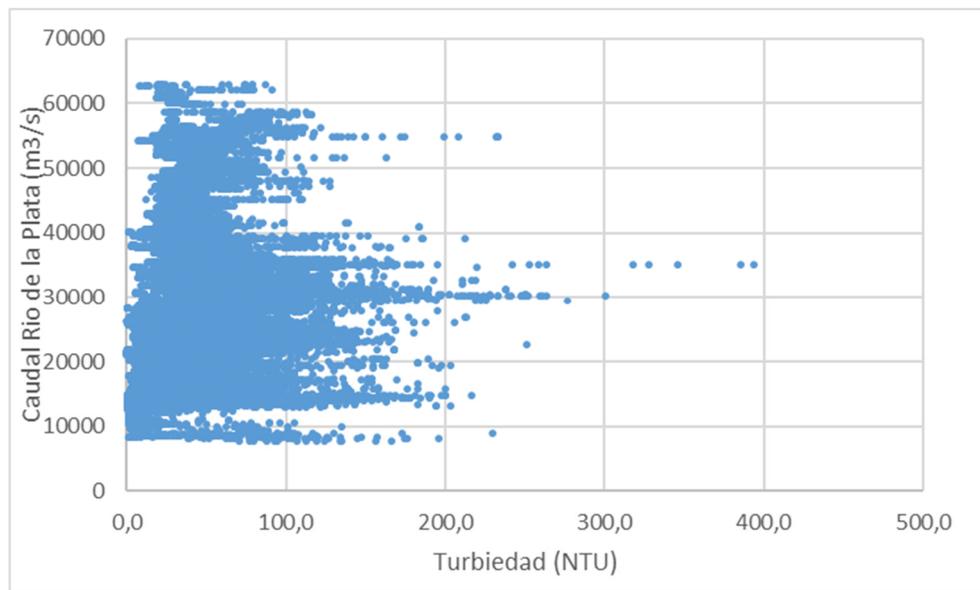


Figura 75: Diagrama de dispersión entre Turbiedad (NTU) y el caudal del Río de la Plata (m³/s).

Para analizar el efecto del caudal sobre la ubicación de la cuña salina, resultó de interés comparar directamente estas variables. Como se aprecia en la Figura 76, se observa una tendencia general de descenso de la salinidad a medida que aumentan los caudales (coef. de Pearson: -0,290), aunque se observan episodios de salinidades relativamente altas aún para los máximos valores de caudal. Por otro lado, también se observa que para caudales menores a 12.000 m³/s, la salinidad no baja de 3,5 psu (percentil 87%), lo cual podría indicar la presencia de la cuña salina en la zona de Punta del Tigre.

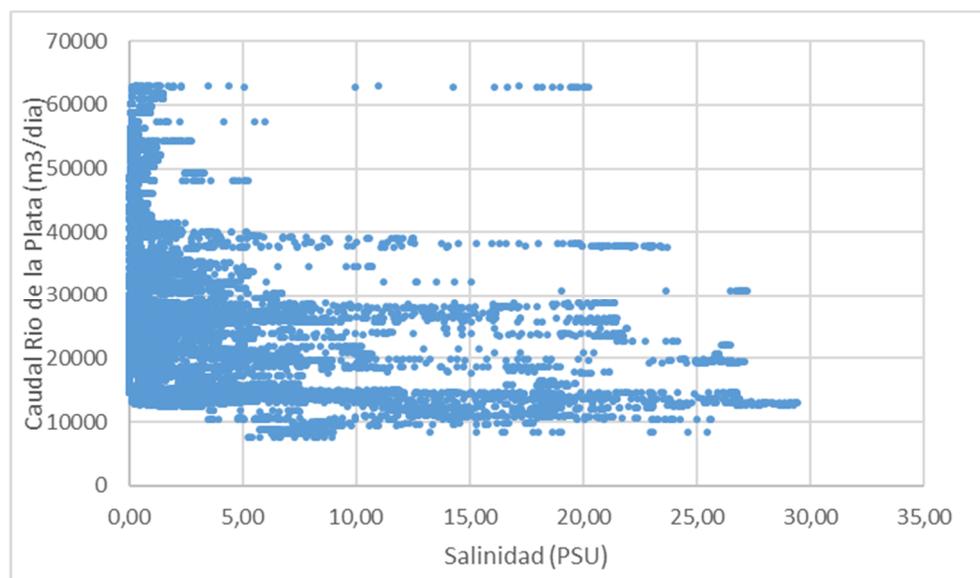


Figura 76: Diagrama de dispersión entre la Salinidad (psu) y el caudal del Río de la Plata (m³/s).

7.2.6.6 Relación con la temperatura.

En la Figura 77 se presenta el diagrama de dispersión entre la Turbiedad y la Temperatura. Aunque la correlación resulta ser débil (coef. De Pearson = -0.191), esta existe y a priori no sería despreciable.

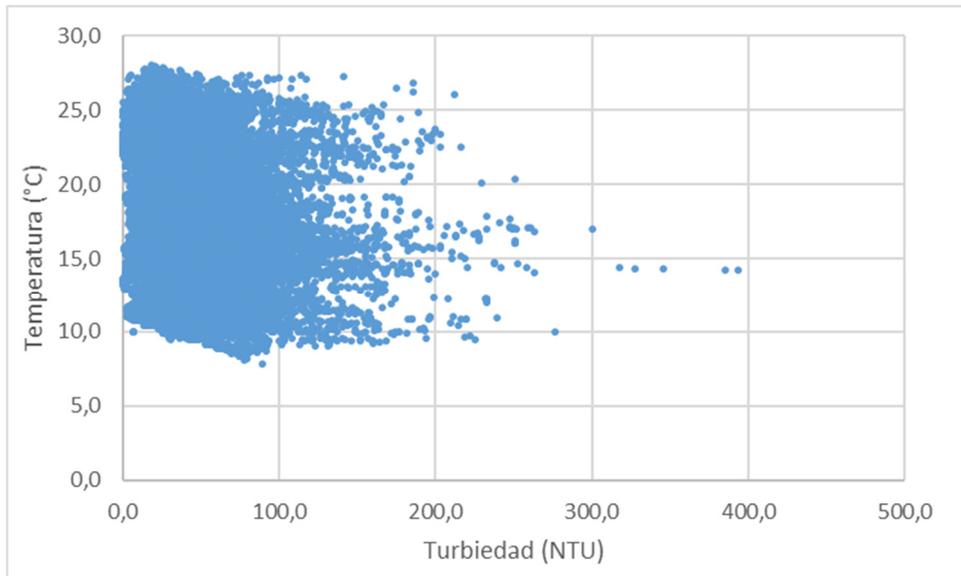


Figura 77: Diagrama de dispersión entre la Turbiedad (NTU) y la Temperatura (°C).

7.2.7 Comparación de los periodos con y sin obra de dragado.

En este apartado se presentará un análisis del comportamiento de las distintas variables, entre los periodos con obra y sin obra de dragado, para evaluar los cambios naturales en el Río de la Plata entre dichos periodos. Esto resulta necesario a la hora de comparar los resultados de turbiedad, ya que el RdLP puede presentar cambios temporales importantes, en particular en algunas variables con influencia en la concentración de sedimentos en suspensión. De todo el período analizado (12/02/2015 – 16/04/2020) el período en que se considera que hubo obras de dragado fue desde marzo de 2016 a octubre de 2019.

7.2.7.1 Turbiedad.

A continuación, se presentan algunos estadísticos generales del monitoreo continuo de turbiedad, para los dos periodos: sin obra y con obra (Tabla 7).

Tabla 7: Resultados de la medición continua de turbiedad (sin obra y con obra).

Periodo	Turbiedad (NTU)	
	SIN OBRA	CON OBRA
Media	38,7	43,9
Máximo	239	394
Mínimo	0,2	0,0

En la comparación de ambos periodos, para el monitoreo continuo, tanto la prueba t de Student como la prueba de Mann-Whitney, arrojaron resultados indicativos de que existe una diferencia estadísticamente significativa entre ambas muestras. En la Figura 78 se presenta una comparación gráfica de la distribución de ambas series. Se observa claramente que existe una diferencia en el comportamiento de la turbiedad entre los dos períodos analizados. Lo mismo se puede observar en los histogramas que se presentan en la Figura 79.

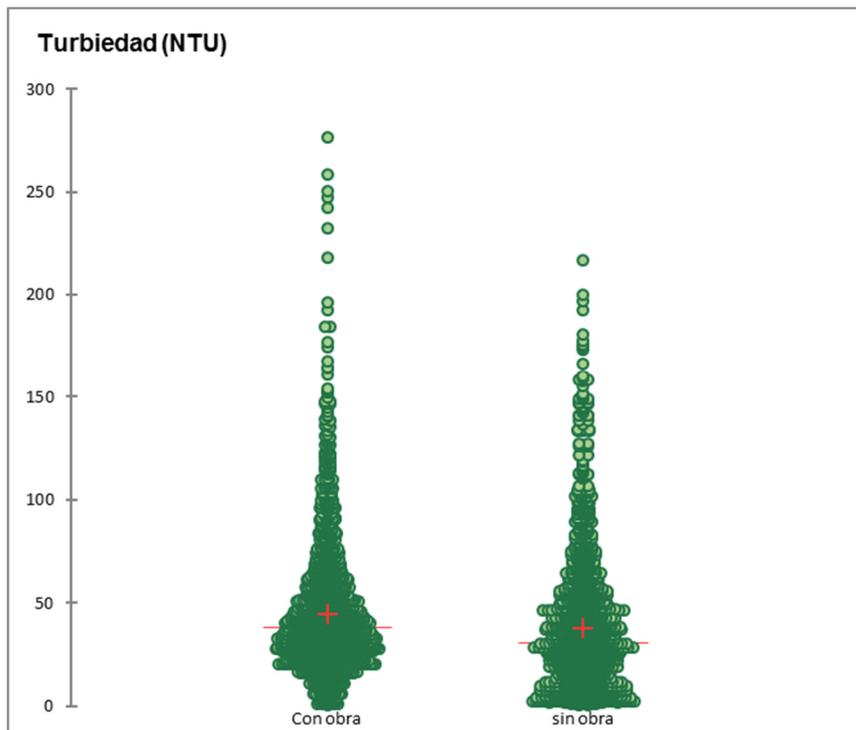


Figura 78: Distribución de los valores de la medición continua de turbiedad, separados en los períodos con obra (izquierda) y sin obra (derecha). El ancho de cada fila representa la cantidad de datos para cada valor, mientras que la cruz roja corresponde a la media y la línea roja a la mediana.

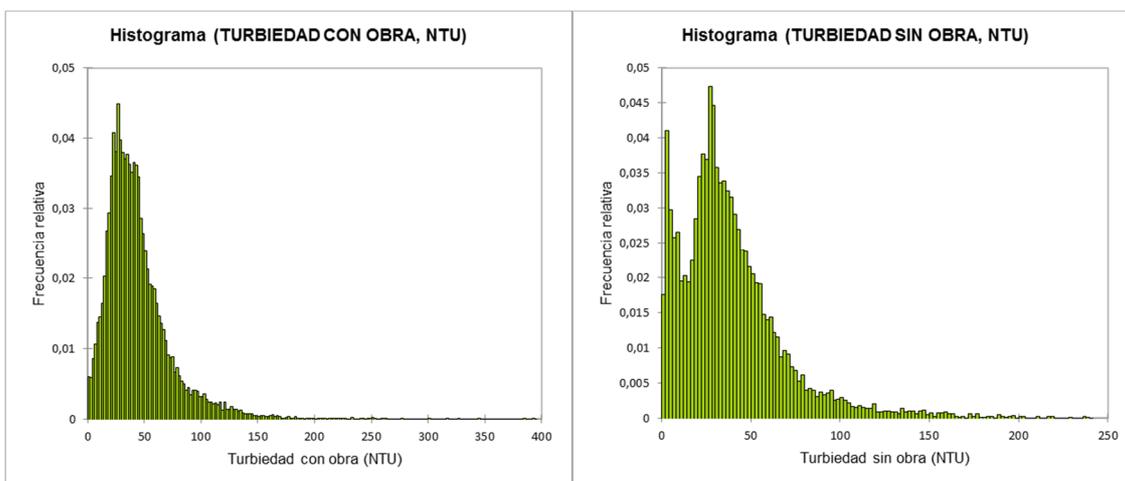


Figura 79: Histogramas de turbiedad. A la izquierda se presenta el histograma para el período con obra, mientras que a la derecha se presenta el histograma para el período sin obra.

El siguiente gráfico (Figura 80) muestra la serie completa de turbiedad (línea azul), los datos monitoreados durante la obra (puntos anaranjados) y el valor de 130 NTU (línea roja). Se puede observar el episodio de superación durante la obra, como también que existen otros periodos, en que no hubo obras, donde dicho valor fue superado numerosas veces. Se observa que, para el periodo sin obra, los datos mayores a 130 NTU representan el 2.2% del total de los registros, mientras que para el periodo con obra fue una cantidad menor (1.8%).

Resuspensión de sedimentos por una obra de dragado en el Río de la Plata.

Caso: Central de Ciclo Combinado (UTE), Punta del Tigre, San José.

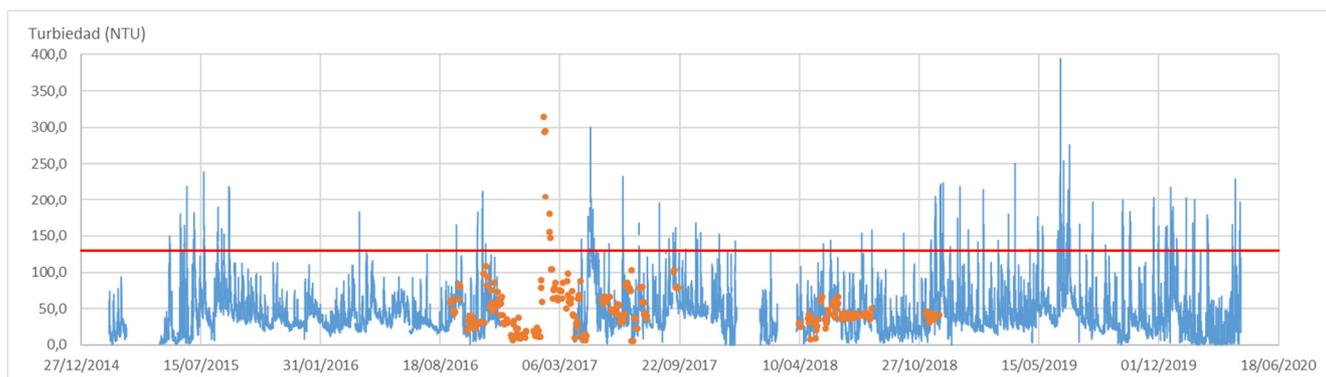


Figura 80: Serie de turbiedad medida en continuo (línea azul), monitoreo de obra (puntos anaranjados) y el valor de 130 NTU (línea roja).

7.2.7.2 Otras variables.

A continuación, se presenta una comparación de las demás variables, para ambos periodos. En la Tabla 8 se presentan las medias, máximos y mínimos, de las variables monitoreadas de forma continua.

Tabla 8: Comparación de resultados generales de la medición continua para los dos periodos: con obra (25655 observaciones) y sin obra (10493 observaciones).

Variable	Mínimo		Máximo		Media		Desv. típica	
	SI	NO	SI	NO	SI	NO	SI	NO
OBRA								
Temperatura (°C)	7,9	9,6	27,9	28,0	16,2	20,7	4,2	4,6
Turbiedad (NTU)	0,0	0,2	393,6	239,4	43,9	38,7	28,8	29,8
Salinidad (psu)	0,0	0,02	27,2	29,4	1,3	2,9	3,3	5,5
Caudal (m³/s)	13038	7619	58677	62931	27355	28156	9277	13028
Velocidad del fondo (m/s)	0,004	0,005	2,370	0,652	0,137	0,140	0,088	0,087

En relación a la salinidad, se observa que en el período sin obra el 56 % de las observaciones tienen un valor de salinidad entre 0 y 1 psu, mientras que en el periodo con obra ese valor asciende al 76%. Esto puede observarse en los histogramas de la Figura 81.

Esta diferencia en el comportamiento de la salinidad podría estar explicando la presencia del pico de valores de turbiedad próximos a 0, que se observa claramente en el histograma de derecha en la Figura 79, y no así en el histograma de la izquierda. Observando esa diferencia en el comportamiento de las series de turbiedad, resultó de interés analizar qué papel puede estar jugando la salinidad en las mismas. Para ello se filtró la serie de turbiedad, de forma de obtener solamente aquellos datos asociados a salinidades menores a 1 psu. En la Figura 82 se presenta el histograma original y el filtrado para mostrar sus diferencias. Se realizó el mismo procedimiento para el periodo con obra, cuyo resultado se presenta en la Figura 83.

Se puede apreciar que, al eliminar los registros con salinidades mayores a 1 psu, el comportamiento de la serie de turbiedad para el periodo sin obra muestra un cambio significativo en su histograma, mientras que eso no sucede para el periodo con obra.

Resuspensión de sedimentos por una obra de dragado en el Río de la Plata.
Caso: Central de Ciclo Combinado (UTE), Punta del Tigre, San José.

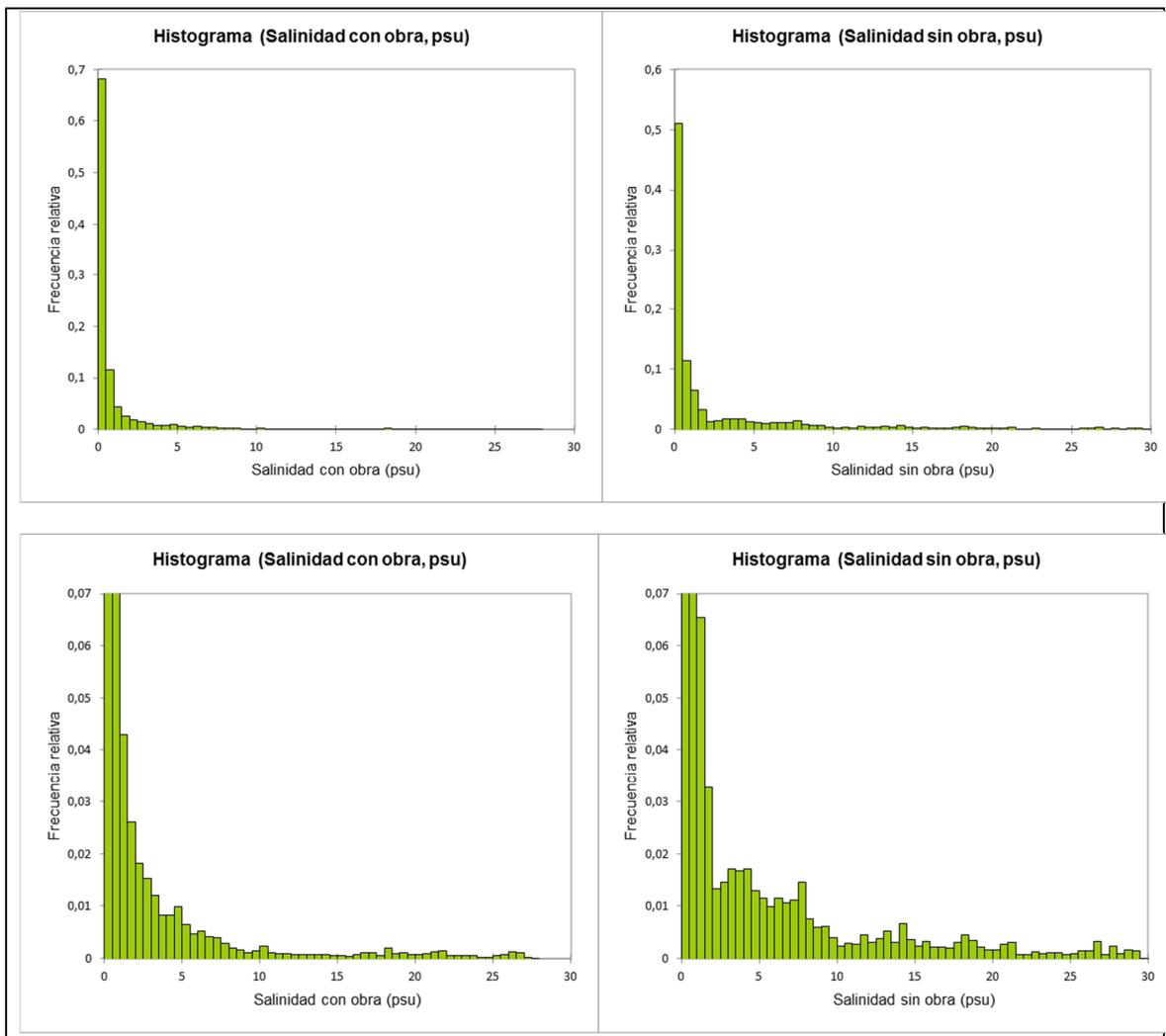


Figura 81: Histogramas de salinidad. Arriba se presentan los histogramas completos, mientras que debajo se muestra un mayor detalle de los valores más bajos. A la izquierda se presenta el periodo con obra y a la derecha sin obra.

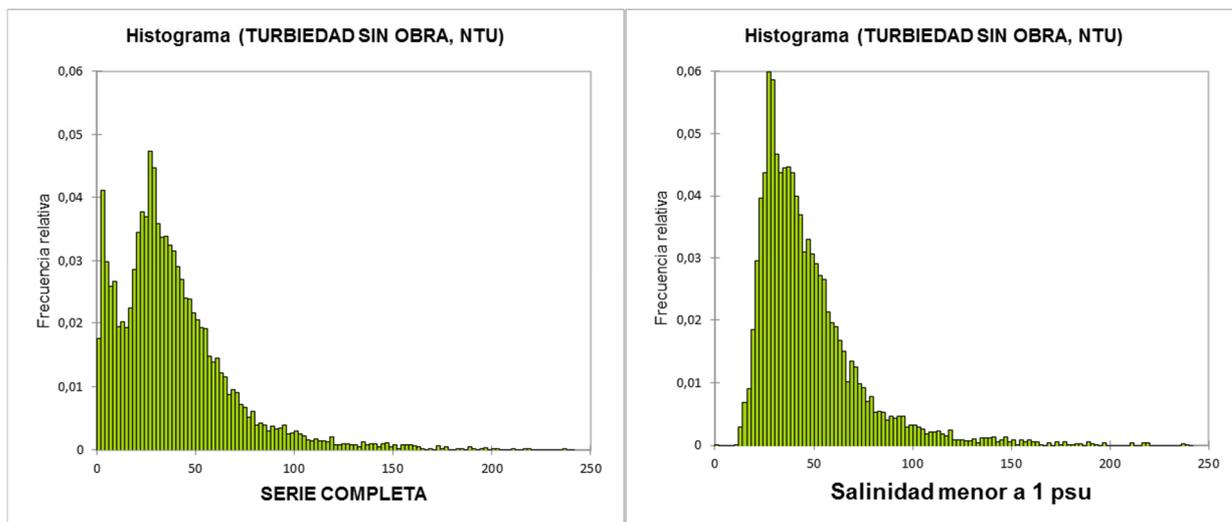


Figura 82: Histogramas de turbiedad del periodo SIN OBRA. A la izquierda se presenta el histograma completo y a la derecha se presenta histograma en el cual se han eliminado los valores correspondientes a salinidades mayores a 1 psu.

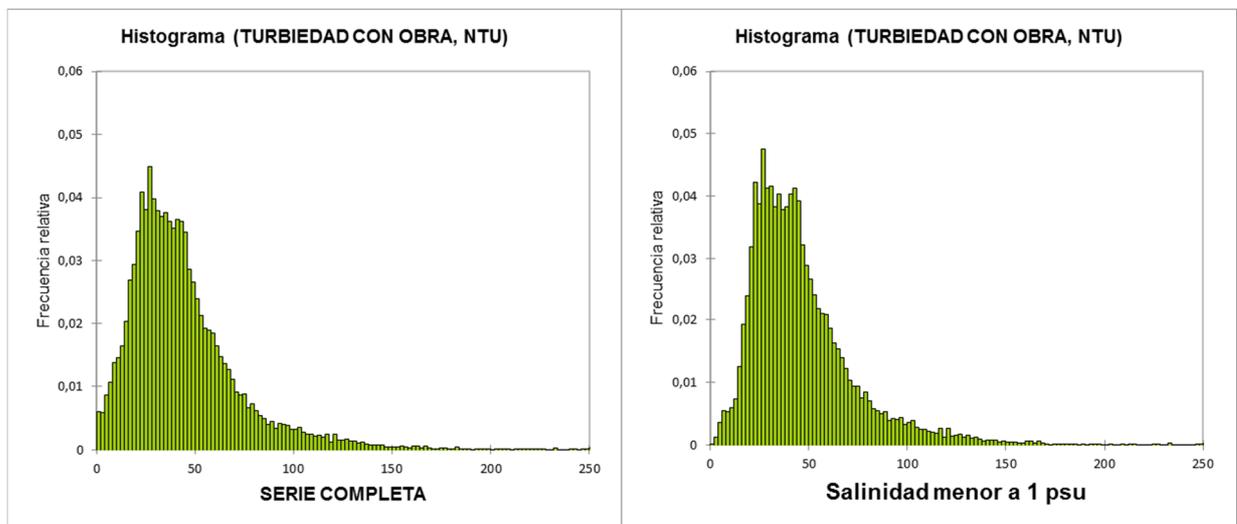


Figura 83: Histogramas de turbiedad del periodo CON OBRA. A la izquierda se presenta el histograma completo y a la derecha se presenta histograma en el cual se han eliminado los valores correspondientes a salinidades mayores a 1 psu.

En relación a la velocidad próxima al fondo (V_f), aunque los valores medios y la distribución de los mismos son muy similares entre periodos (ver Figura 84), tanto la prueba t de Student como la prueba de Mann-Whitney, arrojaron resultados indicativos de que existe una diferencia estadísticamente significativa entre ambas muestras.

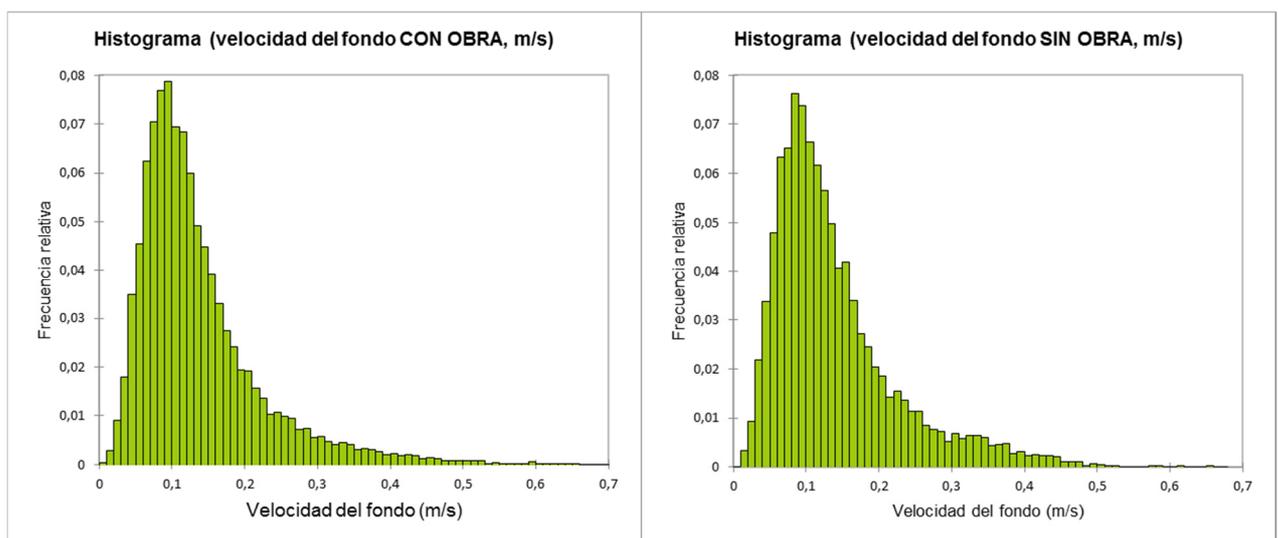


Figura 84: Histogramas de los valores de " V_f ", para los periodos "con obra" (izquierda) y "sin obra" (derecha).

El caudal presentó mínimos más altos y máximos más bajos en el periodo de obra, en comparación con el periodo sin obra, mientras que los valores medios fueron muy similares y las distribuciones presentaron comportamientos muy distintos, como se aprecia en la Figura 85, mostrando mayor variabilidad y más valores bajos para el periodo sin obra.

Resuspensión de sedimentos por una obra de dragado en el Río de la Plata.

Caso: Central de Ciclo Combinado (UTE), Punta del Tigre, San José.

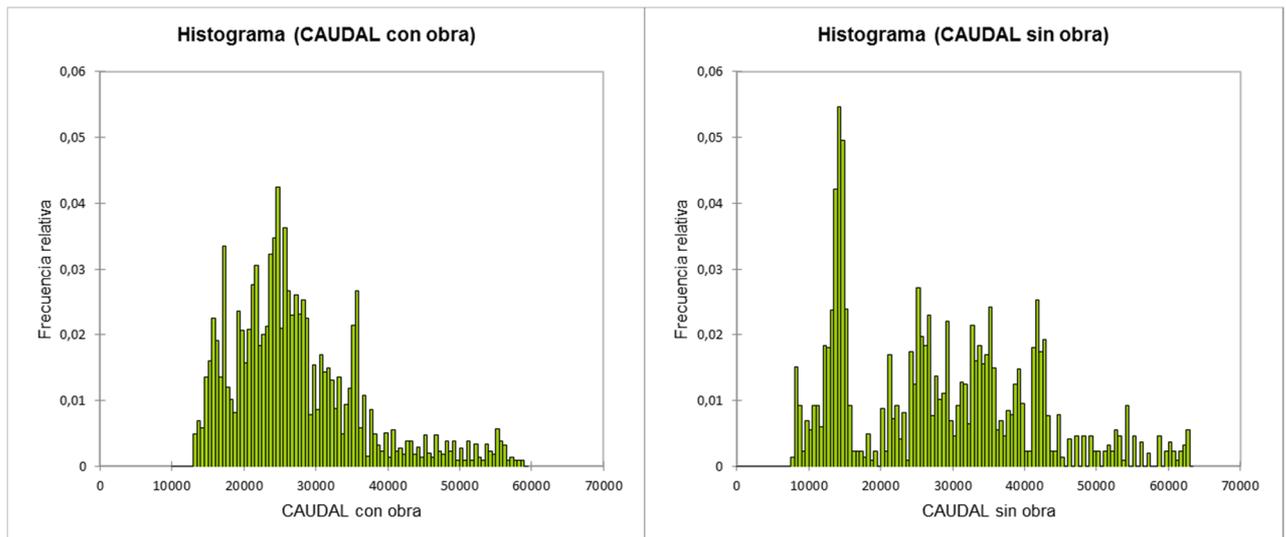


Figura 85: Histogramas de los valores de Caudal del Río de la Plata (m³/s), para los períodos “con obra” (izquierda) y “sin obra” (derecha).

La temperatura, al igual que el caudal, muestra variaciones importantes entre un periodo y otro, posiblemente relacionadas con los cambios estacionales naturales del RdIP. Tanto los mínimos como los máximos presentaron valores similares, sin embargo, el periodo de obra presentó una media 4,5 °C más fría que el periodo sin obra. Si se observan los histogramas (Figura 86) se aprecia un comportamiento bien diferenciado para cada periodo.

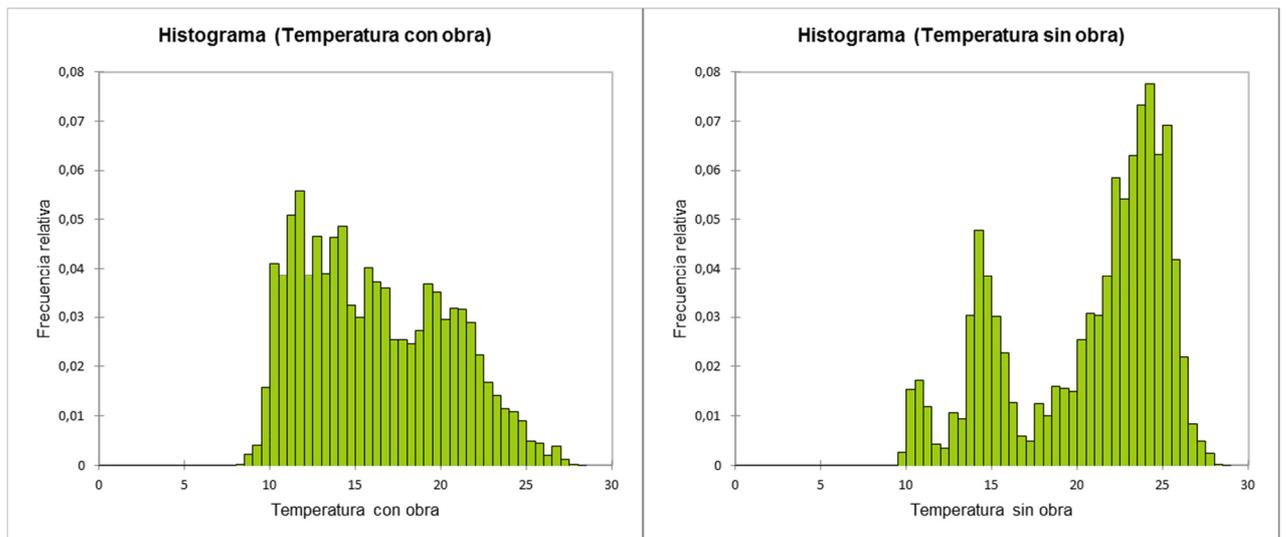


Figura 86 Histogramas de los valores de Temperatura para los períodos “con obra” (izquierda) y “sin obra” (derecha).

Finalmente, se realizó un nuevo ACP de forma de evaluar el comportamiento de todas las variables en su conjunto, comparando ambos períodos. En la Figura 87 se presenta el resultado obtenido para los dos primeros factores. Más allá del análisis variable a variable, en el resultado del ACP se puede observar un comportamiento levemente distinto entre ambos periodos. Se puede observar un corrimiento de la temperatura, desde una posición casi perpendicular a la turbiedad, en el periodo con obra, hacia una posición prácticamente opuesta en el periodo sin obra. En otras palabras, durante el periodo con obra prácticamente no existe correlación entre estas variables, mientras que, en el periodo sin obra, aparece una correlación negativa, aunque no es muy fuerte. Por otra parte, el caudal muestra un aumento del módulo, para el periodo sin obra, siempre opuesto a la salinidad, lo que indica una correlación más marcada entre estas

variables, para dicho periodo. En contraposición, se observa que el conjunto de variables turbiedad, velocidad próxima al fondo y salinidad, no cambian significativamente sus posiciones relativas, ni sus módulos, lo que indica que las relaciones entre estas variables no cambiaron significativamente entre un periodo y otro.

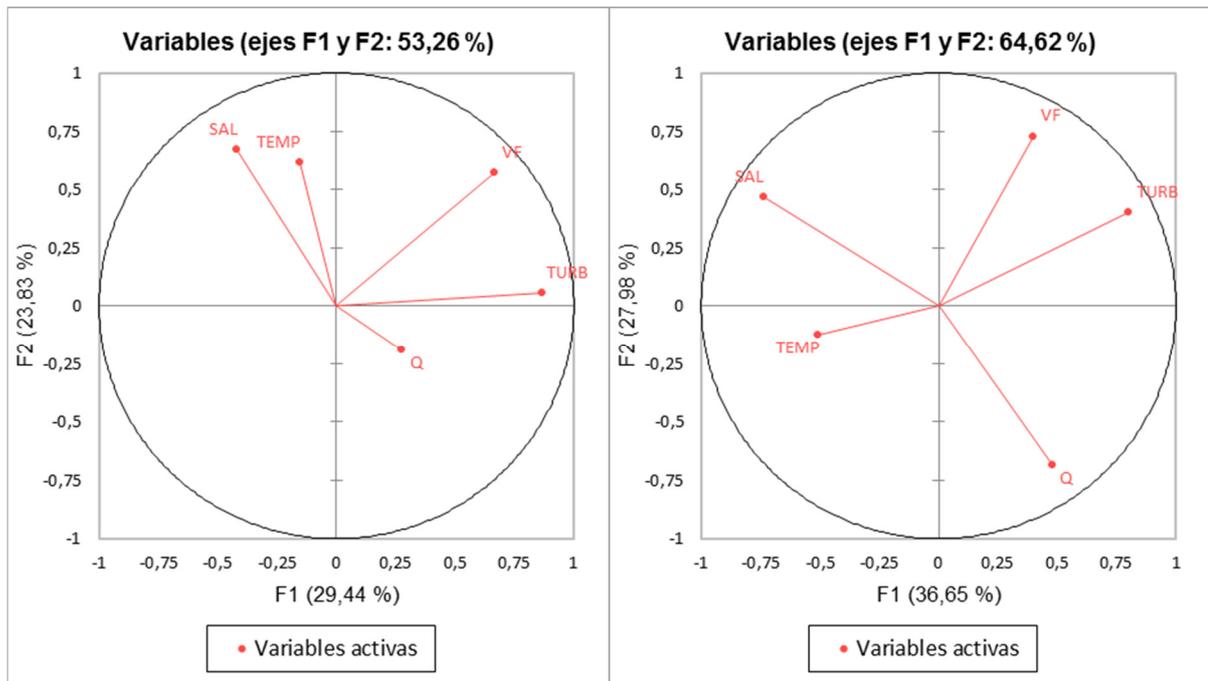


Figura 87: Análisis de Componentes Principales para el periodo con obra (Izquierda) y período sin obra (derecha).

7.2.8 Influencia de la corriente en el monitoreo de obra.

Por último, se analizó la influencia de la corriente en el resultado del monitoreo de obra. Concretamente, se buscó si existía una diferencia entre los valores de turbiedad en ciertos puntos de monitoreo, que estuviera explicada por la dirección e intensidad de la corriente al momento de la toma de muestras. Como fue mencionado anteriormente, el monitoreo se realizó sobre cuatro puntos periféricos a la obra, según se presenta en la Figura 3. Se puede observar que los puntos 1 y 3 se encuentran prácticamente alineados en la dirección Oeste-Este, en relación al área central de la zona de dragado. Por otro lado, como se observa en la Figura 88, sobre dicha dirección se da la componente más significativa de la corriente (IMFIA, 2016).

Considerando lo anterior, se comparó la diferencia de la turbiedad medida entre los puntos 1 y 3, en relación con la intensidad de la corriente media en la columna de agua, en la dirección Este-Oeste (Figura 89 y Figura 90). Tal como se puede observar en dichas figuras, no se puede identificar una clara relación entre las diferencias de turbiedad (entre los puntos 1 y 3) y la intensidad de corriente en la dirección Este-Oeste.

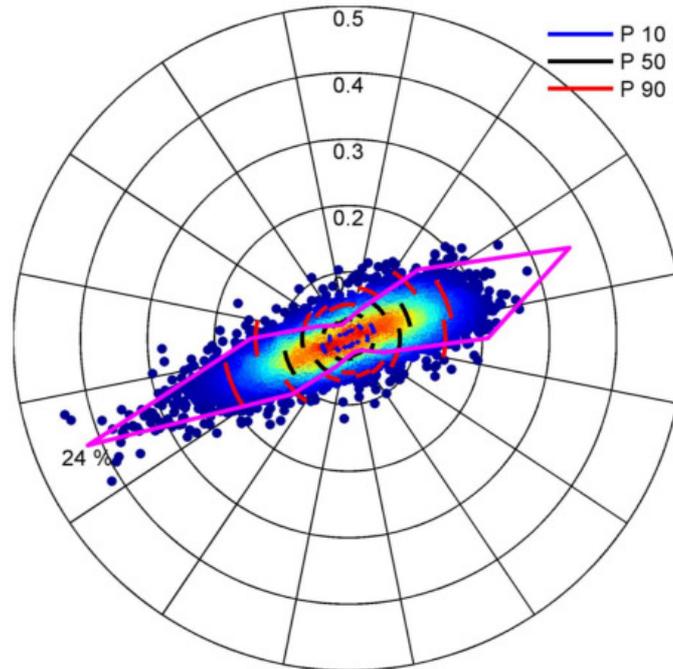


Figura 88: Distribución de velocidades promedio en la columna de agua entre 0,85 y 2,65 m del lecho en m/s. Los colores indican densidad de datos, colores cálidos más densidad que colores fríos. Los arcos azul negro y rojo indican los percentiles 10, 50 y 90 para cada uno de los sectores de dirección. La línea magenta conecta los porcentajes de ocurrencia de registros en cada sector respecto al número total de registros, el porcentaje se indica para el sector preponderante y sirve de escala para los porcentajes de los demás sectores (Fuente: IMFIA, 2016).

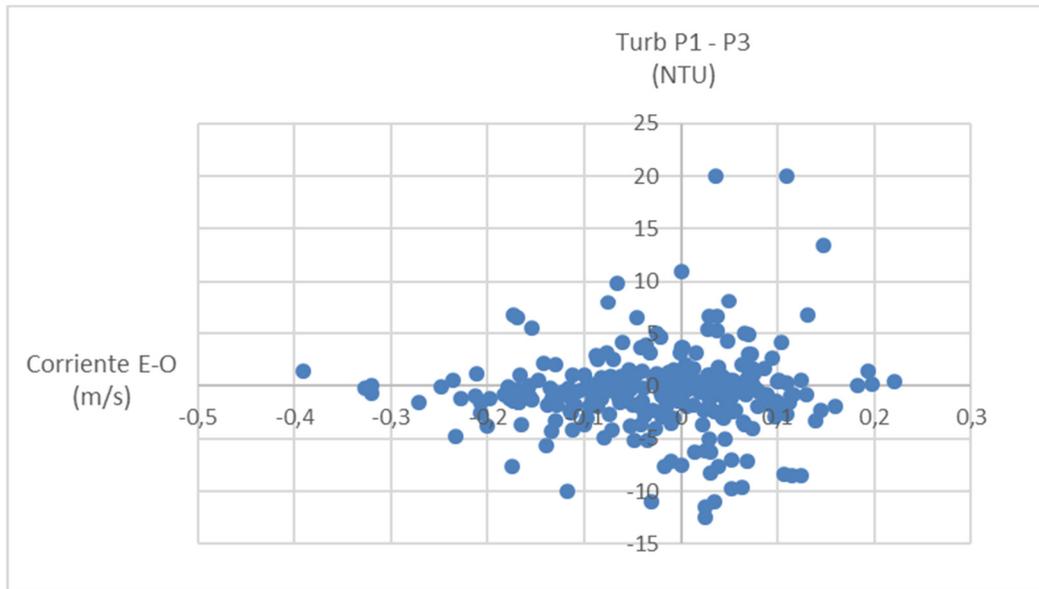


Figura 89: Diferencia entre la turbiedad medida en los puntos 1 y 3 en función de la intensidad de corriente media en la dirección Este-Oeste (los valores de corriente positivos corresponden a la dirección Este).

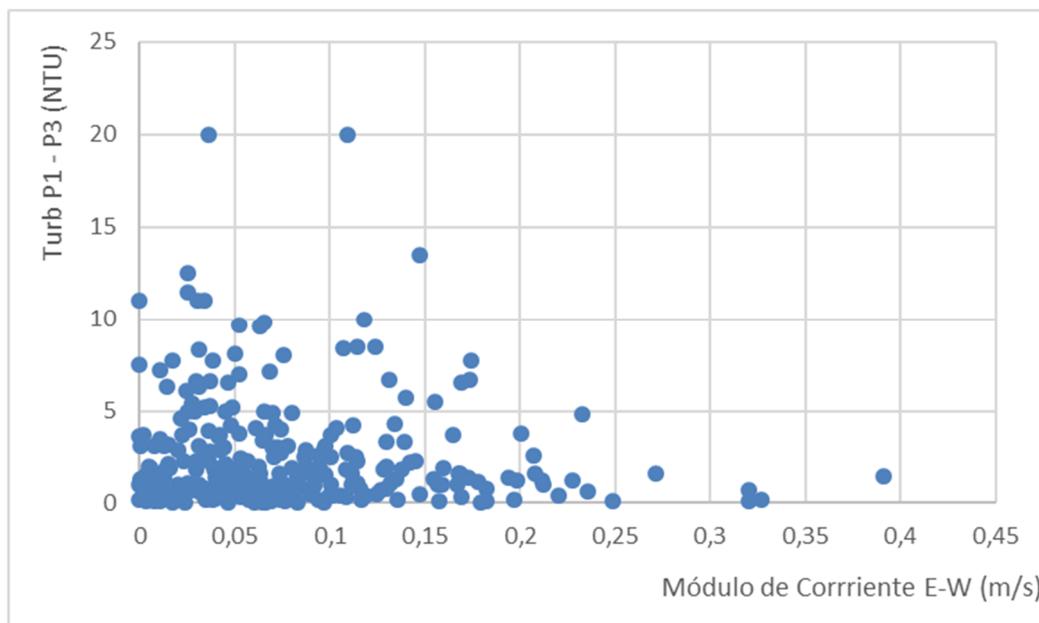


Figura 90: Valor absoluto de la diferencia entre la turbiedad medida en los puntos 1 y 3 en función del módulo de corriente media, en la dirección Este-Oeste.

7.3 Discusión de resultados obtenidos.

A continuación, se presentan las principales observaciones y conclusiones resultantes del análisis realizado sobre los datos recabados de los monitoreos.

En relación al monitoreo de control ambiental de obra, la primera observación a destacar es que no se observan diferencias significativas en los valores de turbiedad entre los 4 puntos de monitoreo, tanto para el monitoreo de turbiedad como el de profundidad de Disco Secchi. A su vez, no se identificó una relación entre las diferencias de turbiedad entre puntos y la dirección e intensidad de la corriente (analizado para los puntos 1 y 3), por lo cual se estima que la pluma

Resuspensión de sedimentos por una obra de dragado en el Río de la Plata.

Caso: Central de Ciclo Combinado (UTE), Punta del Tigre, San José.

de sedimentos no alcanza los puntos de monitoreo o, por el contrario, estos fueron afectados por la misma en similar magnitud. Si se considera que los puntos de monitoreo determinan la zona de afectación de las obras y teniendo en cuenta los resultados obtenidos y las variaciones naturales del Río en la zona (aprox. de 0 a 400 NTU), se puede concluir que la resuspensión de sedimentos no fue detectada en el perímetro de dicha zona, por lo que se concluye que la afectación fuera de la misma, si la hubo, no fue significativa.

Para futuros trabajos, en cuanto a la definición de la ubicación de los puntos de monitoreo, puede ser de utilidad realizar una modelación de la extensión y movimiento de la pluma, de forma previa. Como se vio anteriormente, para ello es necesario contar con información sobre las características de los sedimentos, de los equipos de dragado a utilizar e información de la hidrodinámica del cuerpo de agua.

Por otro lado, en relación al cumplimiento del criterio ambiental establecido por DINAMA, se observó que el mismo fue superado en seis oportunidades, representando un 2,1% de los registros. Se destaca que los incumplimientos se dieron en los 4 puntos en forma simultánea y en días prácticamente corridos, todos entre el 8 y el 19 de febrero de 2017. Teniendo en cuenta estos resultados y el comentario del párrafo anterior, no resulta evidente que el dragado haya influido de forma significativa en dichos incumplimientos, los cuales parecen estar más asociados a un periodo de aumento natural de los sedimentos en suspensión, dentro de lo esperable para dicha zona del Río.

En cuanto a la comparación entre las mediciones de turbiedad y de profundidad de Disco Secchi, se obtuvo una correlación lineal entre $\text{Log}(\text{Turb})$ y $\text{Log}(D)$, con $R^2=0,57$. Se observó también que, en función de la salinidad, dicha correlación muestra un comportamiento levemente distinto, presentando una pendiente más pronunciada para las observaciones con salinidades bajas (menor a 1psu). Teniendo en cuenta las variaciones temporales y espaciales observadas, no parece representar una diferencia significativa. Sin embargo, ante grandes variaciones de salinidad, ya sean temporales como espaciales, puede ser importante evaluar este efecto a la hora de comparar resultados.

Gracias al monitoreo continuo realizado por UdelaR se obtuvieron extensas series temporales para las variables: turbiedad, salinidad, oleaje, corrientes y temperatura. Tanto estas series como la de los caudales del RdIP, muestran en general variaciones muy importantes, sin observarse ciclos muy definidos, salvo para el ciclo estacional de la temperatura.

En términos generales se observa que la turbiedad se ve afectada por la salinidad, el caudal del Río de la Plata y por el oleaje y las corrientes, aunque no presenta una correlación muy fuerte con ninguna de dichas variables. Esto parece indicar que el comportamiento de la turbiedad en la zona responde a las diferentes condiciones del RdIP, donde por momentos está más relacionada con cierto grupo de variables y en otros momentos por otras.

En cuanto a la relación de la turbiedad con la temperatura, aunque no se ve una correlación muy fuerte, la misma no es despreciable. Una posible explicación de este resultado se debe a la disminución del aporte de las cuencas en los meses cálidos, ya que se observó un aumento de la salinidad a medida que los caudales disminuyen y, por otro lado, que valores altos de salinidad se asocian a menores valores de turbiedad. Dicho en otras palabras, ante el avance de la intrusión salina del RdIP sobre la zona de Punta del Tigre, la turbiedad tiende a reducirse, tanto por efecto de la floculación como por la presencia de masas de aguas más claras. En estas condiciones la turbiedad varía negativamente con los cambios de salinidad y positivamente debido a eventos de altas corrientes y oleaje, con capacidad de resuspender los sedimentos del fondo. Por otra parte, en situaciones en que la cuña salina se encuentra lejos de Punta del Tigre, la turbiedad parece estar determinada por los sedimentos en suspensión aportados desde las cuencas, con variaciones asociadas a los eventos de resuspensión por corrientes y oleaje.

Resuspensión de sedimentos por una obra de dragado en el Río de la Plata.

Caso: Central de Ciclo Combinado (UTE), Punta del Tigre, San José.

De la comparación de los datos de turbiedad entre el monitoreo continuo (UdelaR) y el discreto (de obra), a pesar de que se obtuvo una curva de tendencia lineal, con $R^2= 1$, se observó una dispersión importante en el análisis punto a punto, quedando aproximadamente el 20% de las observaciones por fuera de una banda de tolerancia de 20 NTU de amplitud. Se presume que estas diferencias podrían explicarse debido a algunos de los siguientes aspectos, aunque no sería esperable en los casos de diferencias muy grandes:

- Metodología de comparación: se tomaron los promedios entre los 4 puntos, para el monitoreo discreto, mientras que se tomó el promedio entre las 12:00 y 14:00 hs para el monitoreo continuo.
- Tecnología de los equipos utilizados
- Profundidad de la toma de muestras

En relación a la comparación entre los periodos con y sin obra, se observa que, además de la turbiedad, tanto la temperatura, como la salinidad y el caudal (variables que no se ven afectadas por el dragado) mostraron comportamientos distintos entre ambos períodos. Por el contrario, la velocidad próxima al fondo presentó un comportamiento muy similar entre periodos. En particular, si analizamos el periodo sin obra, vemos un comportamiento bien diferenciado de la serie de turbiedad según el rango de salinidades (psu mayor o menor a 1) y, si comparamos las series de turbiedad entre ambos periodos, solamente considerando los valores asociados a bajas salinidades, ya no se observan diferencias significativas entre las series. Esto muestra que las diferencias de turbiedad entre los periodos con obra y sin obra, están determinadas en gran medida por los cambios naturales del RdIP, siendo difícil poder atribuir las diferencias observadas a las actividades de dragado. Si nos quedáramos solamente con la comparación estadística inicial (univariable) entre las series de turbiedad, para ambos períodos, podríamos concluir erróneamente que el dragado tuvo una incidencia significativa en los valores de turbiedad durante el periodo de obra, lo cual, a la vista de los resultados que surgen de un análisis más detallado, resulta incorrecto.

8 Conclusiones.

El trabajo realizado permitió consolidar una base de información sobre la temática del dragado, en relación a los equipos y técnicas más utilizadas y los posibles impactos ambientales provocados por la resuspensión de sedimentos, asociada a este tipo de obras, así como también sobre algunos aspectos legales y de control. Esta base resultó necesaria para contextualizar la obra y el monitoreo ejecutados en Punta del Tigre, con el objetivo de realizar una evaluación más profunda de los resultados obtenidos y poder discutir aspectos del diseño del plan de monitoreo ejecutado. Esto requirió también una base de conocimiento de las características y dinámicas del Río de la Plata, con foco en la zona de Punta del Tigre, para poder interpretar cómo las distintas variables se relacionan con los sedimentos en suspensión. A continuación, se resumen los principales resultados y conclusiones obtenidos a lo largo del trabajo.

Primeramente, se destaca que, tanto para el establecimiento de límites ambientales, como para el diseño de los planes de monitoreo y la posterior interpretación de los resultados, resulta indispensable contar con una base de conocimiento de la hidrodinámica, la calidad del agua y la ecología del ambiente que se busca proteger. Esto resulta más significativo para obras de dragado de gran porte, ante la presencia de contaminantes en los sedimentos o ambientes particularmente sensibles.

Teniendo en cuenta que el equipo de dragado seleccionado para esta obra (tipo “clamshell”) no es de los que presenta mayores factores de resuspensión, junto con la ausencia de contaminantes en los sedimentos, parece razonable que no se adoptaran medidas adicionales para reducir la resuspensión. Aun así, para evitar restricciones operativas debido a posibles incumplimientos de los límites establecidos, se buscó reducir el transporte de sedimentos por fuera del área afectada a las obras, con la instalación de mallas flotantes. Estas mallas no resultaron efectivas, debido posiblemente a deficiencias en su diseño, en relación a las condiciones de corrientes y oleaje a las que estuvieron expuestas una vez instaladas, lo cual provocó que al poco tiempo no estuvieran en condiciones de cumplir su función.

Considerando las referencias de normativa internacional consultadas, en relación al control de las plumas de sedimentos provocadas por obras de dragado, parece adecuado establecer límites *ad hoc*, para cada proyecto y emplazamiento en particular, tal como se realizó en este caso. Se observa que el valor límite establecido (130 NTU en el promedio móvil de 3 días consecutivos) es un valor que es superado de forma natural en esa zona del río. Sin conocer los criterios con que se estableció dicho límite originalmente, considerando que a la fecha se cuenta con mucha más información del sitio, sería prudente discutir sobre la adecuación del valor establecido. Dadas las características de río, en particular en la zona de Punta del Tigre, donde la turbiedad puede variar hasta en dos órdenes de magnitud (de ~0 a ~400 NTU) podría ser acertado pensar en un límite basado en un aumento por sobre un nivel de línea de base, ya sea un valor fijo o porcentual, tal como lo plantean algunas referencias consultadas.

Antes de establecer un parámetro de control y límites operativos, es necesario identificar con claridad cuáles son los elementos del ambiente que buscamos proteger. O sea, determinar si lo que nos preocupa es, por ejemplo, el efecto de la cantidad y calidad de los sólidos resuspendidos sobre la biota, la reducción de la penetración de la luz en la columna de agua o el enterramiento de organismos del fondo marino, por mencionar algunos de los posibles impactos identificados. Y, partiendo de esa base, seleccionar adecuadamente los parámetros correspondientes.

Debido a que en general no existe información suficientemente detallada de forma preliminar, en relación a los efectos de la resuspensión de sedimentos sobre los distintos ambientes, parece adecuado aplicar el principio de precaución, pero en virtud de los costos asociados a las obras de dragado y las implicancias de posibles limitantes operativas, puede ser conveniente invertir esfuerzos en obtener mayor información de forma previa. Un aspecto importante a considerar es la gran variabilidad temporal y espacial que presenta el Río de la Plata en algunas zonas, como

Resuspensión de sedimentos por una obra de dragado en el Río de la Plata.

Caso: Central de Ciclo Combinado (UTE), Punta del Tigre, San José.

por ejemplo en Punta del Tigre, lo cual puede generar problemas si se extrapola información de otras zonas, aunque sean relativamente cercanas, o de un corto periodo de monitoreo previo.

En cuanto al procesamiento de la información, se destaca el potencial del ACP (Análisis de Componentes Principales) para el análisis de estos sistemas en que hay muchas variables interrelacionadas en juego. En este caso fue de utilidad además para comparar el comportamiento del conjunto de variables para distintos agrupamientos de observaciones. Sirvió para comparar el comportamiento del río entre los periodos con obra y sin obra, así como también para analizar las diferencias que mostraba el sistema entre las observaciones en dos rangos de salinidad (menores y mayores a 1psu). Es importante mencionar que se debe ser cuidadoso con la interpretación de los resultados, ya que no siempre permiten ser muy concluyente, teniendo en cuenta además que cada par de factores explican solo una porción de la varianza total del sistema. Pero, sobre todo, se debe tener presente que los resultados deberían poder ser cotejados con una interpretación física coherente con los fenómenos que han ocurrido en el río. Más allá de esto, teniendo en cuenta las características de la zona, da la impresión de que el análisis multivariado (ya sea el método ACP u otros similares) resulta un complemento necesario del análisis variable a variable.

Respecto al diseño e implementación del plan de monitoreo, se concluye lo siguiente:

- Más allá de que el límite de control operativo fue determinado para el parámetro turbiedad, parece natural optar por este parámetro para el monitoreo debido a su facilidad de determinación en campo. Un aspecto que podría ser interesante evaluar es la posibilidad de instalar equipos de medición continua. Esto evitaría movilizar una embarcación y personal cada día de dragado, aunque para ello los equipos fondeados tendrían que reportar la información de forma remota. Esto permitiría además contar con más cantidad de información durante las horas de dragado, e incluso, en los días en que no hay dragado o que las condiciones climáticas no permiten la salida de la embarcación y la posibilidad de reportar la información en tiempo real, brindando un mejor control al contratista, al dueño del proyecto y la autoridad ambiental correspondiente.
- Las mediciones con Disco Secchi a priori no aportan mucha información adicional, en cuanto al control del cumplimiento del límite, por lo que no parece necesario realizarlas sistemáticamente. Más allá de eso, debido a lo sencillo y económico de su implementación puede ser una buena herramienta de chequeo del monitoreo de turbiedad. A su vez, sería recomendable determinar turbiedad y SST en laboratorio, para corroborar la información de campo con una frecuencia determinada. Puede ser de utilidad construir una curva de correlación turbiedad-SST para los sedimentos a dragar, sobre todo en ambientes con alto contenido de sólidos en suspensión, cuya curva de correlación puede ser sensiblemente distinta.
- En base a la experiencia de este caso y dado el resultado de la comparación entre los 4 puntos de monitoreo, podría ser recomendable una definición más precisa de la cantidad de puntos y su ubicación, así como determinar la pertinencia de establecer un punto "blanco". Para ello podría realizarse una modelación previa de la extensión y movimiento de la pluma, utilizando tasas de emisión (de acuerdo a los equipos a utilizar) junto con una modelación hidrodinámica, para lo cual también sería necesario contar con una buena caracterización previa de los sedimentos a excavar.

En relación a esto último, se desataca que la modelación realizada por la empresa contratista de forma previa, arrojó información que, a la vista de los resultados obtenido, resultó razonable. Cabe mencionar que la estimación de las tasas de resuspensión son muy sensibles a la velocidad de sedimentación de las partículas consideradas, por lo que una caracterización detallada de los sedimentos parece ser necesaria si se quiere tener una adecuada modelación previa.

Resuspensión de sedimentos por una obra de dragado en el Río de la Plata.

Caso: Central de Ciclo Combinado (UTE), Punta del Tigre, San José.

- Más allá de que en este caso la definición de tomar una sola muestra en cada ubicación parece razonable, ya que la profundidad es baja y se observó en general una columna de agua bien mezclada en vertical, en aguas más profundas y/o con mayor estratificación, puede ser recomendable tomar muestras a más de una profundidad.

A modo de conclusión general, se considera que el diseño del monitoreo fue adecuado, aunque posiblemente sea razonable hacerle algún ajuste, considerando además que en la actualidad se cuenta con más información que a la fecha de su implementación. Se destaca que el plan pudo ejecutarse de forma sistemática sin presentarse problemas significativos de implementación o seguimiento. El mismo comentario aplica en lo que respecta al límite del parámetro turbiedad establecido por la autoridad ambiental para este proyecto, el cual fue superado en muy pocas oportunidades y, a pesar de que dichas superaciones no serían atribuibles al dragado, no implicaron mayores inconvenientes al avance de la obra, minimizando la posibilidad de ocurrencia de impactos significativos sobre el ambiente receptor.

9 Referencias.

- Acha, E.M.; Mianzan, H.; Guerrero, R.; Carreto, J.; Giberto, D.; Montoya, N. y Carignan, M. (2008). An overview of physical and ecological processes in the Río de la Plata Estuary. *Continental Shelf Research* 28: 1579-1588.
- Anchor Environmental CA (2003). Literature Review of Effects of Resuspended Sediments due to Dredging Operations. Los Angeles Contaminated Sediments Task Force.
- APHA/AWWA/WEF (1999). Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater. Standard Methods, 541.
- Averett et al (1990). Review of removal, containment and treatment technologies for remediation of contaminated sediment in the great lakes. Department Of The Army United States Army Corps of Engineers - United States Environmental Protection Agency.
- Barua, D.K. (2001). Field Techniques for Suspended Sediment Measurement. *Journal of Hydraulic Engineering*. Sep 2001.
- Bohlen, W. F.; Cundy, D. F. & Tramontano, J. M. (1979). Suspended material distributions in the wake of estuarine channel dredging operations. *Estuarine and Coastal Marine Science*, 9(6), 699–711. [https://doi.org/10.1016/S0302-3524\(79\)80004-3](https://doi.org/10.1016/S0302-3524(79)80004-3)
- Braverman (2011). Historia de vida temprana de la corvina rubia (*Micropogonias furnieri*, Sciaenidae) en el estuario del Río de la Plata. Facultad de Ciencias Exactas y Naturales. Universidad de Buenos Aires.
- Brown, C. L. & Clarck, R. (1968). Observations on Dredging and Dissolved Oxygen in a Tidal Waterway. *Water Resources Research*, 4(6), 1381–1384. <https://doi.org/10.1029/WR004i006p01381>
- Clifton y Dingler (1984). Wave-formed structures and paleoenvironmental reconstruction. *Marine Geology* 60 (1984).
- Cohen J. (1988) Statistical power analysis for the behavioral sciences. 2nd ed. Hillsdale, N.J: L. Erlbaum Associates;. 567 p
- Collins, M. A. (1995). Dredging-Induced Near-Field Resuspended Sediment Concentrations and Source Strengths. Dredging Operations Tehcnical Support Program (August 1995).
- CAMPBELL SCIENTIFIC INC (2017). OBS-3+ and OBS300, Suspended Solids and Turbidity Monitors Instruction Manual, Campbell Scientific Inc.
- COTAMA (2007). Propuesta de modificación del Decreto 253/79 y modificativos. Grupo GESTA AGUA, Comisión Técnica Asesora de la Protección del Medio Ambiente (COTAMA).
- Cyrus, D. P. & Blaber, S. J. M. (1987). The influence of turbidity on juvenile marine fish in the estuaries of Natal, South Africa. *Continental Shelf Research*, 7(11–12), 1411–1416. [https://doi.org/10.1016/0278-4343\(87\)90046-X](https://doi.org/10.1016/0278-4343(87)90046-X).
- Cyrus, D. P. & Blaber, S. J. M. (1992). Turbidity and salinity in a tropical northern australian estuary and their influence on fish distribution. *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, 35(6), 545–563. [https://doi.org/10.1016/S0272-7714\(05\)80038-1](https://doi.org/10.1016/S0272-7714(05)80038-1).
- Davies-Colley, R. (1988). Measuring water clarity with a black disk. *Limnology and Oceanography*, 33(4 part 1), 616–623. <https://doi.org/10.4319/lo.1988.33.4.0616>.
- Desprez, M. (2000). Phisical and biological impact of marine. *ICES Journal of Marine Science*.
- DINAMA (2009). Determinación de SST, SSF y SSV en aguas naturales y efluentes

- líquidos. Manual de Procedimientos Analíticos para Muestra Ambientales.
- DINARA (2014). Boletín Estadístico Pesquero 2013. Dirección Nacional de Recursos Acuáticos - MGAP.
- DINARA (2018). Análisis de los efectos de la actividad de la Central de Ciclo Combinado de UTE en Punta Tigre (San José) sobre los recursos hidrobiológicos en el Río de la Plata. Dirección Nacional de Recursos Acuáticos - MGAP.
- Dodge, R. E. & Vaisnys, J. R. (1977). Coral Populations and Growth Patterns: Responses to Sedimentation and Turbidity Associated with Dredging. *J. Mar. Sci* 35: 715–730. http://nsuworks.nova.edu/occ_facarticles.
- Dyer (1973). *Estuaries: A Physical Introduction*. Wiley Interscience Publ.: John Wiley and Sons.
- EPA (1975). Finger-fill canal studies, Florida and North Carolina. United States Environmental Protection Agency.
- EPA (1976). Impacts of construction activities in wetlands of the United States. United States Environmental Protection Agency.
- EPA (1996). Estimating contaminant losses from components of remediation alternatives for contaminated sediments. United States Environmental Protection Agency.
- EPA/USACE (2004). Evaluating Environmental Effects Of Dredged Material Management Alternatives -- A Technical Framework. Department Of The Army United States Army Corps of Engineers - United States Environmental Protection Agency.
- Fenton & McKee (1990). On calculating the lengths of water waves. *Coastal Engineering* 14.
- Felix D.; Albayrak I. & Boes R. (2016). Continuous measurement of suspended sediment concentration: Discussion of four techniques. Laboratory of Hydraulics, Hydrology and Glaciology (VAW), ETH Zurich, Switzerland.
- Felix, D. (2017). In-situ investigation on real-time suspended sediment measurement techniques: Turbidimetry, acoustic attenuation, laser diffraction (LISST) and vibrating tube densimetry. *International Journal of Sediment Research*. <https://doi.org/10.1016/j.ijsrc.2017.11.003>.
- Framiñan, M. B. & Brown, O. B. (1996). Study of the Río de la Plata turbidity front. Part I: Spatial and temporal distribution. *Continental Shelf Research*. [https://doi.org/10.1016/0278-4343\(95\)00071-2](https://doi.org/10.1016/0278-4343(95)00071-2).
- FREPLATA (2005). Análisis diagnóstico transfronterizo del Río de la Plata y su frente marítimo. Comisión Administradora del Río de la Plata - Comisión Técnica Mixta del Frente Marítimo.
- GEOMETOCEAN Uruguay (2013). Aumento de turbiedad y cambios de la línea de costa debido a la construcción de un muelle temporario y canal de acceso y ductos principales. Estudio elaborado en el marco de la construcción de la Central de Ciclo Combinado. Administración Nacional de Usinas y Trasmisiones Eléctricas (UTE) - Uruguay.
- Government of Western Australia (2010). BLNG Precinct Dredging and Spoil Disposal Assessment. Browse Liquified Natural Gas Precinct - Strategic Assessment Report. Appendix C-13.
- Gray & Gartner (2009). Technological advances in suspended-sediment surrogate monitoring. *Water Resources Research*, Vol. 45.
- Guerrero, R. A.; Osiroff, A. P.; Molinari, G. y Piola, A. R. (2003). Análisis de datos

- históricos de temperatura y salinidad del Río de la Plata y la plataforma adyacente. Informe técnico FREPLATA-INIDEP-SIHN.
- Hayes, D. F. (2000). Sediment Resuspension During Cutterhead Dredging Operations. *Journal of Waterway, Port, Coastal, and Ocean Engineering* Vol. 126(3):153-161. American Society of Civil Engineers.
- Hayes D. F. (2007). Process-based estimation of sediment resuspension losses during bucket dredging.
- Hayes, D. F. & Je, C. (2000). DREDGE Module User ' s Guide. Department of Civil and Environmental Engineering. University of Utah - USA.
- Hayes, D. & Wu, P-Y. (2001). Simple approach to TSS Source Strength estimates. Proceedings of the WEDA XXI Conference, Houston TX.
- Herbich (1992). Handbook of dredging engineering. McGraw-Hill
- IADC-IAPH (2010). Dredging for development. International Association of Dredging Companies - International Association of Ports and Harbors. 6th Edition, December 2010.
- IMFIA. (2016). Monitoreos hidrodinámicos y biológicos en el Río de la Plata en la zona de Punta del Tigre. Informe 3.
- INCOCIV srl. (2013). OFFSHORE SOIL INVESTIGATION REPORT. Estudio elaborado en el marco de la construcción de la Central de Ciclo Combinado. Administración Nacional de Usinas y Trasmisiones Eléctricas (UTE) - Uruguay.
- Johnston, S. A. (1981). Estuarine dredge and fill activities: A review of impacts. *Environmental Management*. <https://doi.org/10.1007/BF01866820>
- Jones, D., & Wills, M. S. (1956). The attenuation of light in sea and estuarine waters in relation to the concentration of suspended solid matter.
- Jones, R. (2016). Assessing the impacts of sediments from dredging on corals. *Marine Pollution Bulletin*, 102(1). <https://doi.org/10.1016/j.marpolbul.2015.10.049>
- Kemps, H. & Masini, R. (2017). Estimating dredge source terms—a review of contemporary practice in the context of Environmental Impact Assessment in Western Australia. Western Australia Marine Science Institution.
- Klapan, E. H.; Welker, J. R.; Kraus & McCourt, S. (1975). Some Factors Affecting the Colonization of a Dredged Channel. *Marine Biology*, 32, 193–204.
- Landaeta, C. J. (1995). Potenciales impactos ambientales generados por el dragado y la descarga del material dragado. Instituto Nacional de Canalizaciones, Dirección de Proyectos e Investigación, Caracas, Venezuela.
- Macchi, G. J., Acha, E. M., & Militelli, M. I. (2003). Seasonal egg production of whitemouth croaker (*Micropogonias furnieri*) in the Río de la Plata estuary, Argentina-Uruguay.
- Madrigal, E. et al. (1985). Tasa de filtración del ostión de manglar (*Crassostrea rhizophorae*, Guilding 1828), a diferentes salinidades y temperaturas. Escuela de Ciencias Biológicas, Facultad de Ciencias Exactas y Naturales, Universidad Nacional, Costa Rica.
- Manheim, F. T. (1970). Suspended matter in surface waters of the atlantic continental margin from Cape Cod to the Florida Keys. *Science, New Series*, Vol. 167.
- Marsh (1994) Monitoring of a dredging operation using innovative sediment tracing techniques.
- MBC (2000). "Turbidity Issues in Relationship to Dredging", Port of Los Angeles. Applied Environmental Sciences.

- McCarthy, J. C.; Pyle, T. E. & Griffin, G. M. (1974). Light transmissivity, suspended sediments and the legal definition of turbidity. *Estuarine and Coastal Marine Science*. [https://doi.org/10.1016/0302-3524\(74\)90019-X](https://doi.org/10.1016/0302-3524(74)90019-X)
- Menéndez, A.; Sarubbi, A. (2007). A model to predict the Paraná delta front advancement, workshop on morphodynamic processes in large lowland rivers. Santa Fe, Argentina.
- Mianzan, H.; Lasta, C.; Acha, E.; Guerrero, R.; Macchi, G; & Bremec, C. (2001). The Río de la Plata Estuary, Argentina-Uruguay. *Coastal Marine Ecosystems of Latin America. Ecological Studies*.
- Mianzán, H.; Brazeiro, A.; Gómez-Erache, M.; & Lo Nostro, F. (2002). Biodiversity. Fluvial and marine biodiversity of the Río de la Plata and its Maritime Front. Documento de trabajo FREPLATA.
- Nagy et al. (1987). Balance de los silicatos disueltos del Río de la Plata. 2do. Congr. Latinoam. Ciencias del Mar.
- Nagy (1989). Bilan des connaissances sur l'hydrologie et l'hydrodynamisme sédimentaire du Río de la Plata. Aports de la teledetection et consequences sur l'environnement biologique. Thesis D.E.A. Océanologie, Univ. Bordeaux-I, Serv. Sédimentologie, Dep. Océanologie et Océanographie.
- Nakai, O. (1978). Turbidity generated by dredging projects. Management of bottom sediments containing toxic substances. Proc. of the Third U.S.-Japan Experts Meetings, EPA-600/3-78-084, 1-47.
- Nightingale & Simenstad (2001). *Dredging Activities: Marine Issues*. University of Washington.
- Palermo, M. R. (2008). *Technical Guidelines for Environmental Dredging of Contaminated Sediments*. U.S. Army Engineer Research and Development Center.
- Pennekamp, J. G. S.; Epskamp, R. J. C.; Rosenbrand, W. F.; Mullie, A.; Wessel, G. L.; Arts, T. & Deibel, I. K. (1996). Turbidity caused by dredging; viewed in perspective. *Terra et Aqua*.
- Postma, H. (1961). Suspended matter and Secchi disc visibility in coastal waters. *Netherlands Journal of Sea Research* 1(3). [https://doi.org/10.1016/0077-7579\(61\)90009-6](https://doi.org/10.1016/0077-7579(61)90009-6)
- Preisendorfer, R. (1986). Secchi Disk science: visual optics of natural waters. *American Society of Limnology and Oceanography*.
- Proyecto EcoPlata (1997). *El Río de la Plata, Una Revisión Ambiental*.
- Puckette. (1998). Evaluation of dredged material plumes — Physical monitoring techniques. DOER Technical Notes Collection, (December, 1998).
- Rai & Kumar (2015). Continuous measurement of suspended sediment concentration: Technological advancement and future outlook. Alternate Hydro Energy Centre, Indian Institute of Technology Roorkee, Uttarakhand, India.
- Soulsby, R. L. & Whitehouse, R.J.S.W. (1997). Threshold of sediment motion in coastal environments. Proceedings Pacific Coasts and Ports '97 Conference, Christchurch. University of Canterbury, New Zealand.
- Steel, E. A. & Neuhauser, S. (2002). A comparison of methods for measuring water clarity. *Journal of the North American Benthological Society*.
- Thackston, E. L. & Palermo, M. R. (2000). Improved methods for correlating turbidity and suspended solids for dredging and disposal monitoring. DOER Technical Notes Collection, U.S. Army Engineer Research and Development Center, Vicksburg, MS.

Resuspensión de sedimentos por una obra de dragado en el Río de la Plata.

Caso: Central de Ciclo Combinado (UTE), Punta del Tigre, San José.

- Trent, L.; Pullen, E. & Proctor, R. (1976). Abundance of macrocrustaceans in a natural marsh and a marsh altered by dredging, bulkheading and filling. *Fishery Bulletin*, Vol 74.
- Tubman, M. W. (1995). Plume measurement system (PLUMES). Technical Manual and Data Analysis Procedures. Department of the Army, Waterways Experiment Station, Corps of Engineers, EEUU.
- UdelaR (2011). Proyecto Central Punta del Tigre, U.T.E. Estudio de la toma y descarga del agua de enfriamiento. Simulación numérica de la pluma térmica y estudio biótico. Informe final.
- Urien (1967). Los sedimentos modernos del Río de la Plata Exterior. *Bol. SIHN* 4(2): 113-213.
- UTE (2011). Estudio de Impacto Ambiental de la Central de Ciclo Combinado. Elaborado por LKSur SA.
- Wilber, D. H. & Clarke, D. G. (2001). Biological effects of suspended sediments : A review of suspended sediment impacts on fish and shellfish with relation to dredging activities in estuaries. *North American Journal of Fisheries Management*.
- Wren; Barkdoll; Kuhnle & Darrow (2000). Field Techniques for suspended sediment measurement. *Journal of Hydraulic Engineering*, February 2000.

10 Apéndice 1 – Reportes del Software XLSTAT

10.1 Análisis de componentes principales

10.1.1 Periodo sin obra

XLSTAT-Estudiante 2021.3.1.1151 - Análisis de Componentes Principales (ACP) - Comienzo: 27/04/2022 a las 21:07:46 / Final: 27/04/2022 a las 21:07:54

Tabla observaciones/variables: Libro = ACP_OBRA_SIN OBRA_V2.xlsx / Hoja = TODOS / Rango = 'TODOS'!\$J\$5:\$N\$32121 / 10493 filas y 5 columnas

Tipo de ACP: Correlación

Filtrar los factores Número máximo = 5

Estandarización: (n-1)

Tipo de biplot: Biplot de correlación / Coeficiente = Automático



Estadísticos descriptivos:

Variable	Observaciones	Obs. con datos perdidos	Obs. sin datos perdidos	Mínimo	Máximo	Media	Desv. típica
TEMP	10493	0	10493	9,573	28,030	20,668	4,561
TURB	10493	0	10493	0,243	239,359	38,736	29,777
SAL	10493	0	10493	0,016	29,408	2,938	5,457
Q	10493	0	10493	7619,084	62930,861	28155,922	13028,182
VF	10493	0	10493	0,005	0,652	0,140	0,087

Resuspensión de sedimentos por una obra de dragado en el Río de la Plata.

Caso: Central de Ciclo Combinado (UTE), Punta del Tigre, San José.

Matriz de correlaciones (Pearson (n-1)):

Variables	TEMP	TURB	SAL	Q	VF
TEMP	1	-0,320	0,202	-0,009	-0,030
TURB	-0,320	1	-0,361	0,094	0,487
SAL	0,202	-0,361	1	-0,491	0,031
Q	-0,009	0,094	-0,491	1	-0,111
VF	-0,030	0,487	0,031	-0,111	1

Los valores en negrita son diferentes de 0 con un nivel de significación $\alpha=0,05$

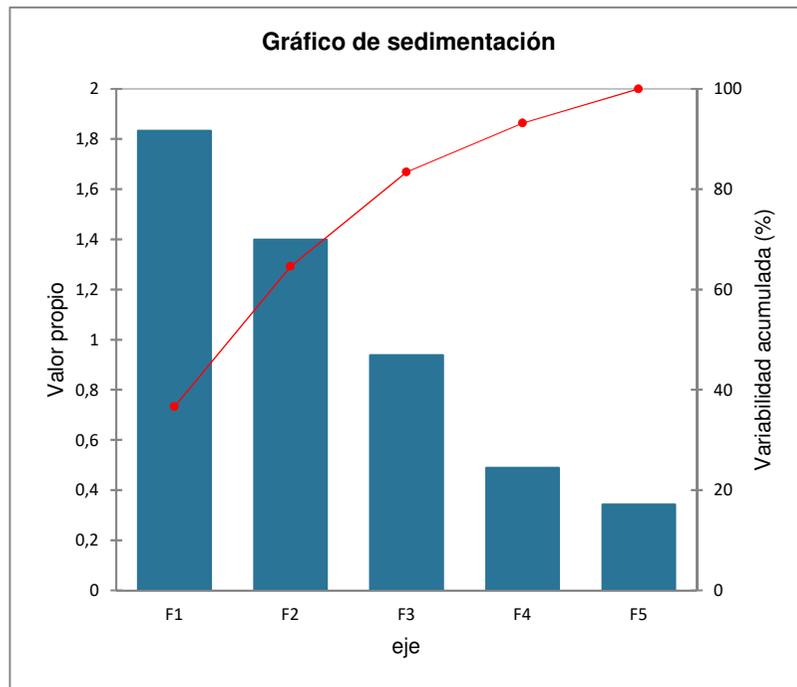
Análisis de Componentes Principales:

Valores propios:

	F1	F2	F3	F4	F5
Valor propio	1,832	1,399	0,938	0,488	0,342
Variabilidad (%)	36,647	27,977	18,766	9,770	6,840
% acumulado	36,647	64,624	83,390	93,160	100,000

Resuspensión de sedimentos por una obra de dragado en el Río de la Plata.

Caso: Central de Ciclo Combinado (UTE), Punta del Tigre, San José.



Vectores propios:

	F1	F2	F3	F4	F5
TEMP	-0,375	-0,105	0,839	-0,344	0,162
TURB	0,592	0,341	0,072	-0,252	0,681
SAL	-0,546	0,398	-0,062	0,551	0,486
Q	0,354	-0,578	0,312	0,639	0,185
VF	0,293	0,616	0,436	0,325	-0,489

Resuspensión de sedimentos por una obra de dragado en el Río de la Plata.

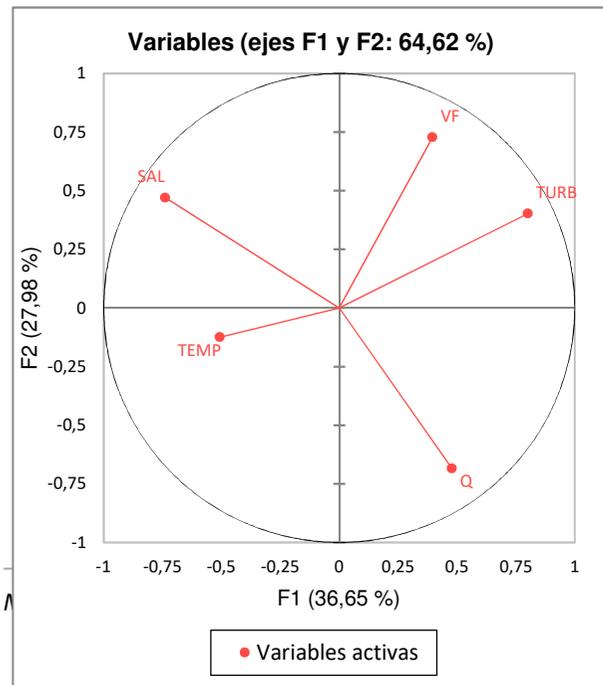
Caso: Central de Ciclo Combinado (UTE), Punta del Tigre, San José.

Cargas factoriales:

	F1	F2	F3	F4	F5
TEMP	-0,507	-0,125	0,813	-0,240	0,095
TURB	0,802	0,403	0,070	-0,176	0,399
SAL	-0,739	0,471	-0,060	0,385	0,284
Q	0,479	-0,684	0,302	0,447	0,108
VF	0,397	0,729	0,422	0,227	-0,286

Correlaciones entre las variables y los factores:

	F1	F2	F3	F4	F5
TEMP	-0,507	-0,125	0,813	-0,240	0,095
TURB	0,802	0,403	0,070	-0,176	0,399
SAL	-0,739	0,471	-0,060	0,385	0,284
Q	0,479	-0,684	0,302	0,447	0,108
VF	0,397	0,729	0,422	0,227	-0,286



Resuspensión de sedimentos por una obra de dragado en el Río de la Plata.

Caso: Central de Ciclo Combinado (UTE), Punta del Tigre, San José.

10.1.2 Periodo con obra

XLSTAT-Estudiante 2021.3.1.1151 - Análisis de Componentes Principales (ACP) - Comienzo: 27/04/2022 a las 21:04:57 / Final: 27/04/2022 a las 21:06:52

Tabla observaciones/variables: Libro = ACP_OBRA_SIN OBRA_V2.xlsx / Hoja = TODOS / Rango = TODOS!\$J\$5:\$N\$32121 / 25655 filas y 5 columnas

Tipo de ACP: Correlación

Filtrar los factores Número máximo = 5

Estandarización: (n-1)

Tipo de biplot: Biplot de correlación / Coeficiente = Automático



Estadísticos descriptivos:

Variable	Observaciones	Obs. con datos perdidos	Obs. sin datos perdidos	Mínimo	Máximo	Media	Desv. típica
TEMP	25655	0	25655	7,864	27,885	16,151	4,219
TURB	25655	0	25655	0,000	393,579	43,906	28,837
SAL	25655	0	25655	0,000	27,209	1,250	3,334
Q	25655	0	25655	13038,345	58676,753	27355,015	9276,772
VF	25655	0	25655	0,004	2,370	0,137	0,088

Resuspensión de sedimentos por una obra de dragado en el Río de la Plata.

Caso: Central de Ciclo Combinado (UTE), Punta del Tigre, San José.

Matriz de correlaciones (Pearson (n-1)):

Variables	TEMP	TURB	SAL	Q	VF
TEMP	1	-0,108	0,145	0,101	0,080
TURB	-0,108	1	-0,197	0,136	0,410
SAL	0,145	-0,197	1	-0,126	0,045
Q	0,101	0,136	-0,126	1	-0,038
VF	0,080	0,410	0,045	-0,038	1

Los valores en negrita son diferentes de 0 con un nivel de significación $\alpha=0,05$

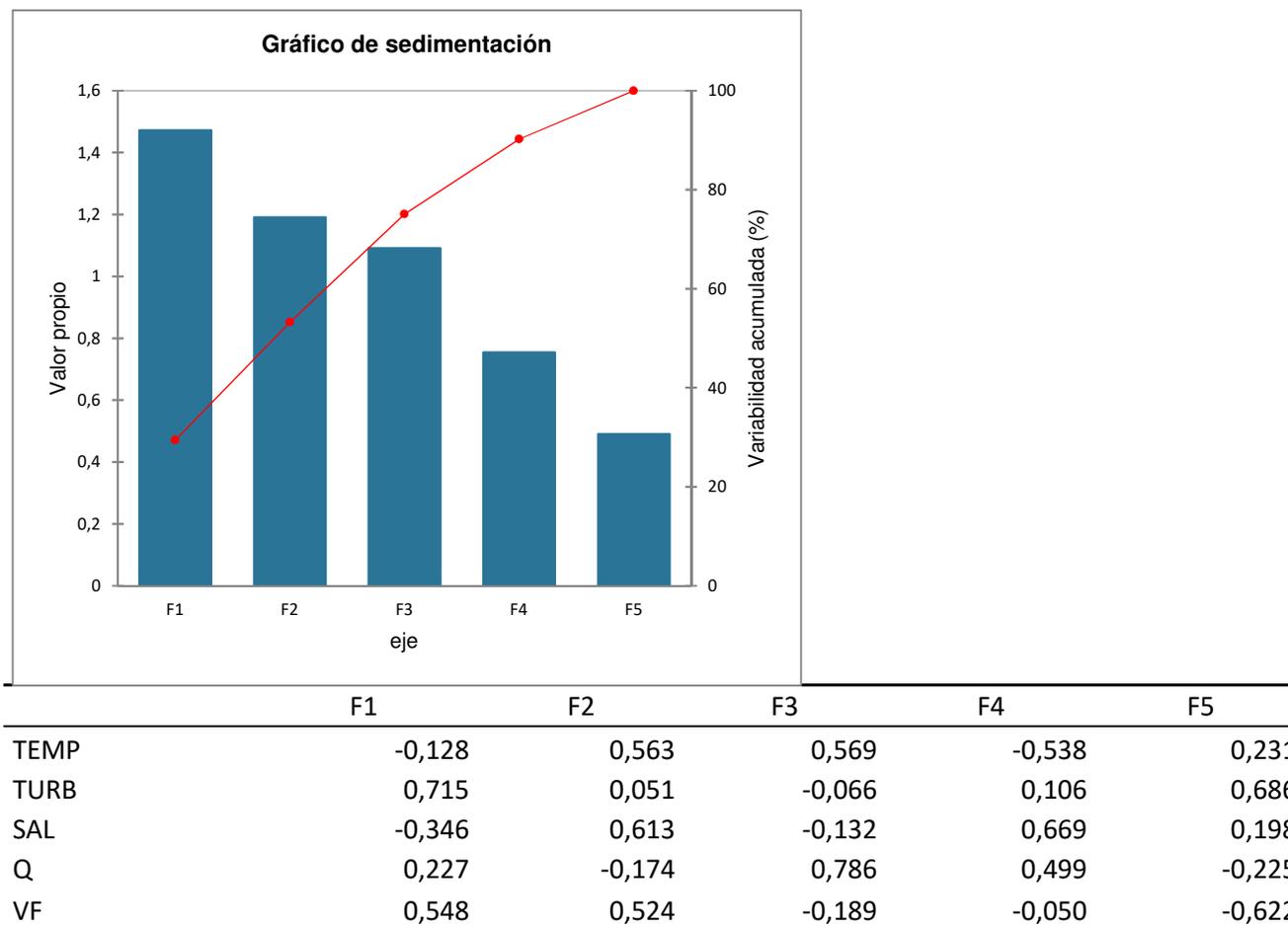
Análisis de Componentes Principales:

Valores propios:

	F1	F2	F3	F4	F5
Valor propio	1,472	1,191	1,092	0,755	0,490
Variabilidad (%)	29,436	23,826	21,832	15,098	9,809
% acumulado	29,436	53,262	75,094	90,191	100,000

Resuspensión de sedimentos por una obra de dragado en el Río de la Plata.

Caso: Central de Ciclo Combinado (UTE), Punta del Tigre, San José.



Resuspensión de sedimentos por una obra de dragado en el Río de la Plata.

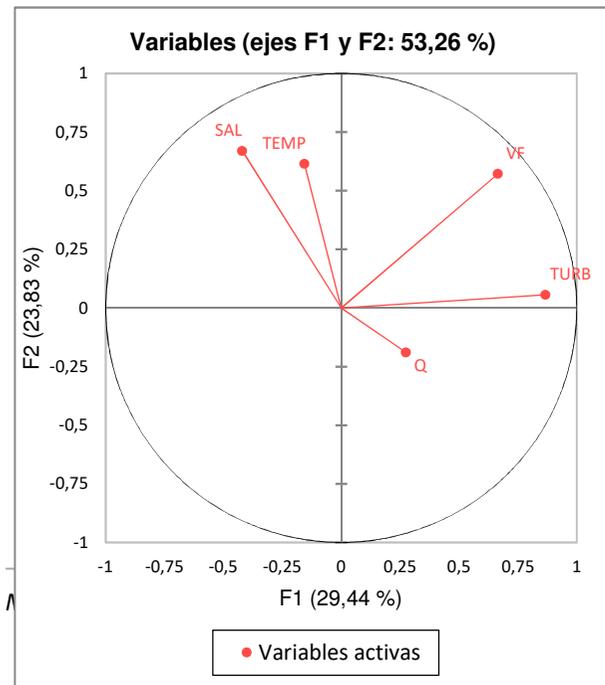
Caso: Central de Ciclo Combinado (UTE), Punta del Tigre, San José.

Cargas factoriales:

	F1	F2	F3	F4	F5
TEMP	-0,156	0,614	0,595	-0,467	0,162
TURB	0,868	0,056	-0,069	0,092	0,480
SAL	-0,419	0,669	-0,138	0,582	0,139
Q	0,276	-0,190	0,822	0,433	-0,158
VF	0,665	0,572	-0,198	-0,043	-0,435

Correlaciones entre las variables y los factores:

	F1	F2	F3	F4	F5
TEMP	-0,156	0,614	0,595	-0,467	0,162
TURB	0,868	0,056	-0,069	0,092	0,480
SAL	-0,419	0,669	-0,138	0,582	0,139
Q	0,276	-0,190	0,822	0,433	-0,158
VF	0,665	0,572	-0,198	-0,043	-0,435



Resuspensión de sedimentos por una obra de dragado en el Río de la Plata.

Caso: Central de Ciclo Combinado (UTE), Punta del Tigre, San José.

10.1.3 Periodo baja salinidad

XLSTAT-Estudiante 2021.3.1.1151 - Análisis de Componentes Principales (ACP) - Comienzo: 27/04/2022 a las 21:13:42 / Final: 27/04/2022 a las 21:13:52

Tabla observaciones/variables: Libro = ACP_SALINIDAD_V2.xlsx / Hoja = Vel fondo / Rango = 'Vel fondo'!\$J\$5:\$N\$33859 / 26993 filas y 5 columnas

Tipo de ACP: Correlación

Filtrar los factores Número máximo = 5

Estandarización: (n-1)

Tipo de biplot: Biplot de correlación / Coeficiente = Automático



Estadísticos descriptivos:

Variable	Observaciones	Obs. con datos perdidos	Obs. sin datos perdidos	Mínimo	Máximo	Media	Desv. típica
TEMP	26993	0	26993	7,864	28,030	16,776	4,683
TURB	26993	0	26993	0,994	393,579	46,996	27,828
SAL	26993	0	26993	0,000	1,000	0,230	0,243
Q	26993	0	26993	12676,953	62930,861	29555,481	10210,274
VF	26993	0	26993	0,005	2,370	0,135	0,088

Resuspensión de sedimentos por una obra de dragado en el Río de la Plata.

Caso: Central de Ciclo Combinado (UTE), Punta del Tigre, San José.

Matriz de correlaciones (Pearson (n-1)):

Variables	TEMP	TURB	SAL	Q	VF
TEMP	1	-0,116	0,108	0,246	0,045
TURB	-0,116	1	-0,021	0,023	0,457
SAL	0,108	-0,021	1	-0,122	-0,007
Q	0,246	0,023	-0,122	1	-0,037
VF	0,045	0,457	-0,007	-0,037	1

Los valores en negrita son diferentes de 0 con un nivel de significación $\alpha=0,05$

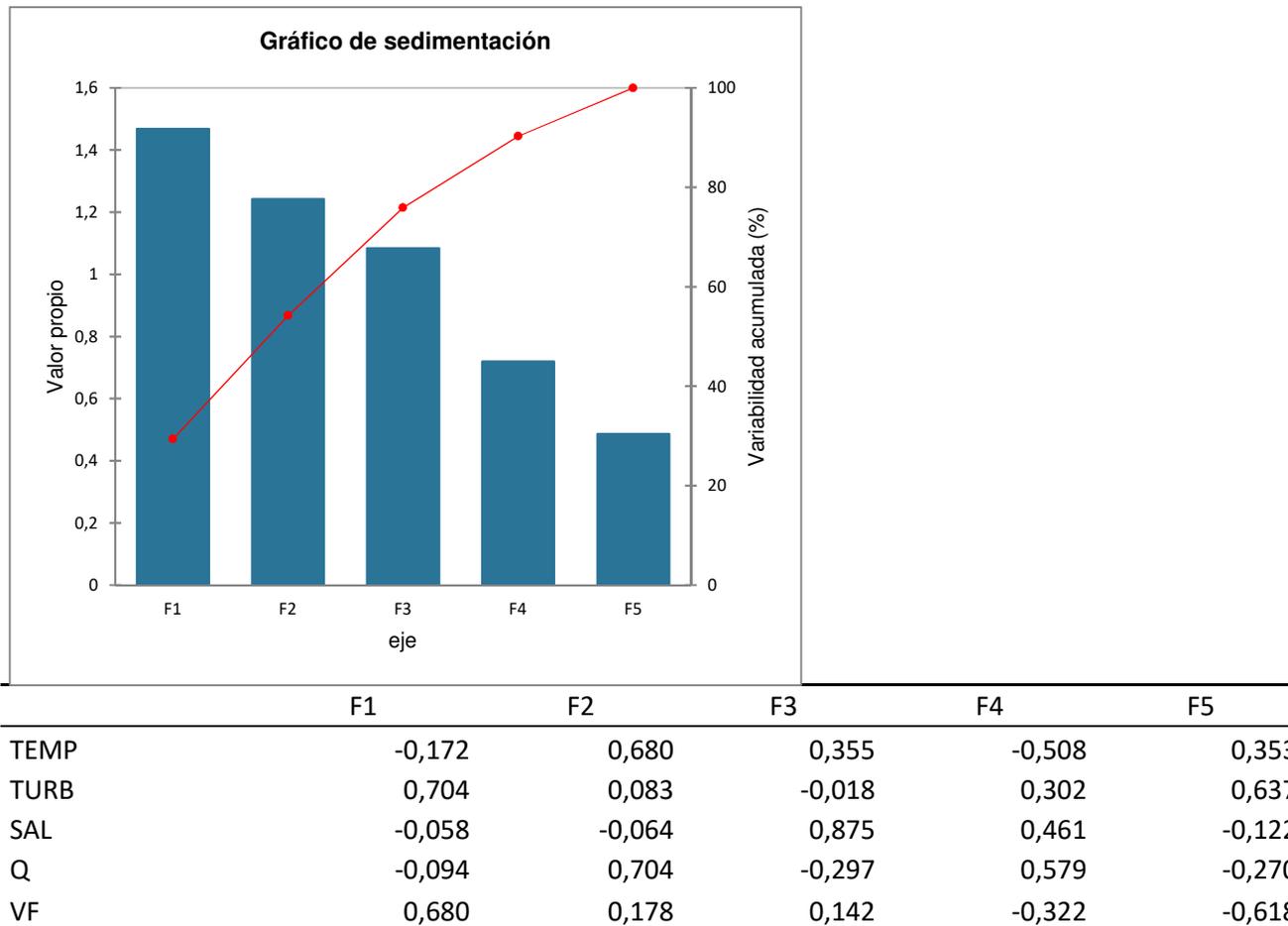
Análisis de Componentes Principales:

Valores propios:

	F1	F2	F3	F4	F5
Valor propio	1,468	1,242	1,085	0,719	0,486
Variabilidad (%)	29,355	24,844	21,691	14,381	9,729
% acumulado	29,355	54,199	75,890	90,271	100,000

Resuspensión de sedimentos por una obra de dragado en el Río de la Plata.

Caso: Central de Ciclo Combinado (UTE), Punta del Tigre, San José.



Resuspensión de sedimentos por una obra de dragado en el Río de la Plata.

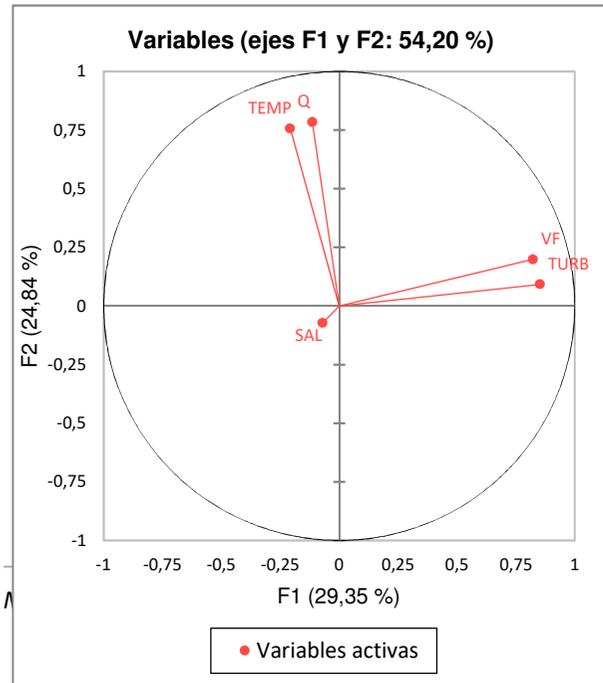
Caso: Central de Ciclo Combinado (UTE), Punta del Tigre, San José.

Cargas factoriales:

	F1	F2	F3	F4	F5
TEMP	-0,208	0,758	0,370	-0,431	0,246
TURB	0,853	0,092	-0,019	0,256	0,444
SAL	-0,070	-0,072	0,911	0,391	-0,085
Q	-0,114	0,784	-0,309	0,491	-0,188
VF	0,823	0,199	0,148	-0,273	-0,431

Correlaciones entre las variables y los factores:

	F1	F2	F3	F4	F5
TEMP	-0,208	0,758	0,370	-0,431	0,246
TURB	0,853	0,092	-0,019	0,256	0,444
SAL	-0,070	-0,072	0,911	0,391	-0,085
Q	-0,114	0,784	-0,309	0,491	-0,188
VF	0,823	0,199	0,148	-0,273	-0,431



Resuspensión de sedimentos por una obra de dragado en el Río de la Plata.

Caso: Central de Ciclo Combinado (UTE), Punta del Tigre, San José.

10.1.4 Periodo alta salinidad

XLSTAT-Estudiante 2021.3.1.1151 - Análisis de Componentes Principales (ACP) - Comienzo: 27/04/2022 a las 21:14:57 / Final: 27/04/2022 a las 21:15:05

Tabla observaciones/variables: Libro = ACP_SALINIDAD_V2.xlsx / Hoja = Vel fondo / Rango = 'Vel fondo'!\$J\$5:\$N\$36153 / 9155 filas y 5 columnas

Tipo de ACP: Correlación

Filtrar los factores Número máximo = 5

Estandarización: (n-1)

Tipo de biplot: Biplot de correlación / Coeficiente = Automático



Estadísticos descriptivos:

Variable	Observaciones	Obs. con datos perdidos	Obs. sin datos perdidos	Mínimo	Máximo	Media	Desv. típica
TEMP	9155	0	9155	10,000	27,367	19,483	4,493
TURB	9155	0	9155	0,000	232,833	28,869	28,976
SAL	9155	0	9155	1,000	29,408	6,193	6,392
Q	9155	0	9155	7619,084	62930,861	21785,024	9151,685
VF	9155	0	9155	0,004	0,652	0,148	0,088

Resuspensión de sedimentos por una obra de dragado en el Río de la Plata.

Caso: Central de Ciclo Combinado (UTE), Punta del Tigre, San José.

Matriz de correlaciones (Pearson (n-1)):

Variables	TEMP	TURB	SAL	Q	VF
TEMP	1	-0,187	0,183	-0,137	-0,008
TURB	-0,187	1	-0,249	0,060	0,493
SAL	0,183	-0,249	1	-0,245	-0,002
Q	-0,137	0,060	-0,245	1	-0,069
VF	-0,008	0,493	-0,002	-0,069	1

Los valores en negrita son diferentes de 0 con un nivel de significación $\alpha=0,05$

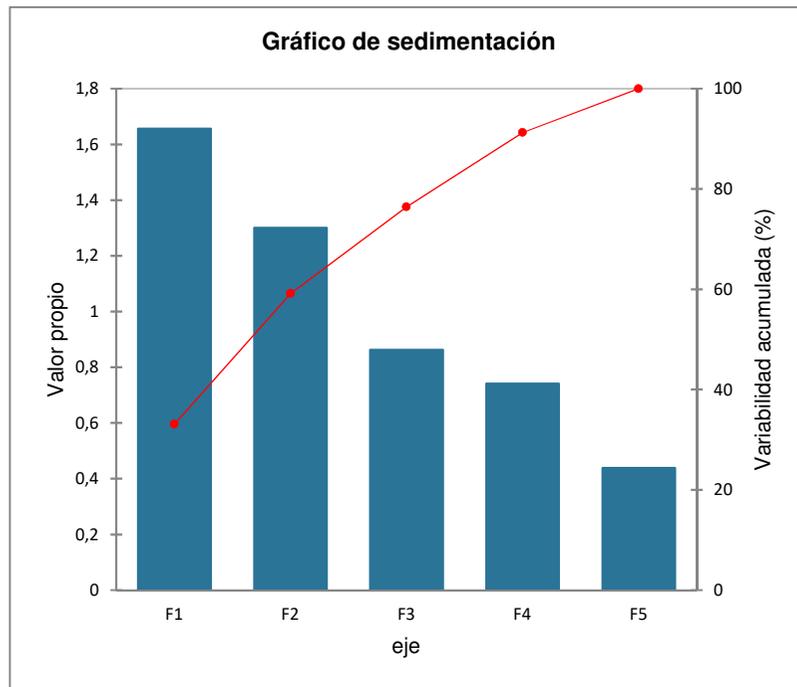
Análisis de Componentes Principales:

Valores propios:

	F1	F2	F3	F4	F5
Valor propio	1,656	1,301	0,863	0,741	0,439
Variabilidad (%)	33,118	26,019	17,263	14,828	8,772
% acumulado	33,118	59,137	76,400	91,228	100,000

Resuspensión de sedimentos por una obra de dragado en el Río de la Plata.

Caso: Central de Ciclo Combinado (UTE), Punta del Tigre, San José.



Vectores propios:

	F1	F2	F3	F4	F5
TEMP	-0,362	0,322	0,846	-0,173	0,142
TURB	0,637	0,278	0,040	-0,030	0,717
SAL	-0,438	0,418	-0,247	0,707	0,269
Q	0,249	-0,562	0,453	0,646	-0,002
VF	0,458	0,573	0,130	0,229	-0,627

Resuspensión de sedimentos por una obra de dragado en el Río de la Plata.

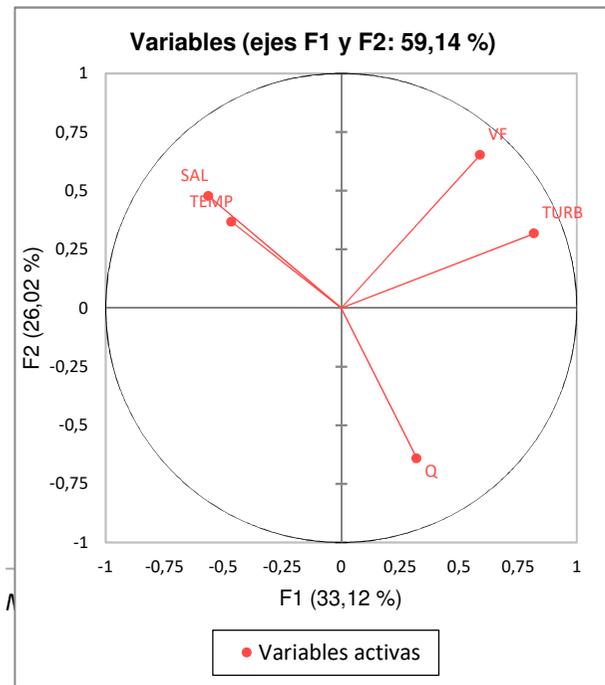
Caso: Central de Ciclo Combinado (UTE), Punta del Tigre, San José.

Cargas factoriales:

	F1	F2	F3	F4	F5
TEMP	-0,465	0,367	0,786	-0,149	0,094
TURB	0,819	0,317	0,037	-0,025	0,475
SAL	-0,563	0,477	-0,230	0,609	0,178
Q	0,321	-0,641	0,421	0,556	-0,001
VF	0,590	0,653	0,121	0,197	-0,415

Correlaciones entre las variables y los factores:

	F1	F2	F3	F4	F5
TEMP	-0,465	0,367	0,786	-0,149	0,094
TURB	0,819	0,317	0,037	-0,025	0,475
SAL	-0,563	0,477	-0,230	0,609	0,178
Q	0,321	-0,641	0,421	0,556	-0,001
VF	0,590	0,653	0,121	0,197	-0,415



Resuspensión de sedimentos por una obra de dragado en el Río de la Plata.

Caso: Central de Ciclo Combinado (UTE), Punta del Tigre, San José.

10.1.5 Variables originales

XLSTAT-Estudiante 2021.3.1.1151 - Análisis de Componentes Principales (ACP) - Comienzo: 27/04/2022 a las 21:22:36 / Final: 27/04/2022 a las 21:22:38

Tabla observaciones/variables: Libro = ACP_Original y Corr fondo.xlsx / Hoja = Original / Rango = Original!\$J\$5:\$Q\$36153 / 36148 filas y 8 columnas

Tipo de ACP: Correlación

Filtrar los factores Número máximo = 5

Estandarización: (n-1)

Tipo de biplot: Biplot de correlación / Coeficiente = Automático



Estadísticos descriptivos:

Variable	Observaciones	Obs. con datos perdidos	Obs. sin datos perdidos	Mínimo	Máximo	Media	Desv. típica
TEMP	36148	0	36148	7,864	28,030	17,462	4,783
TURB	36148	0	36148	0,000	393,579	42,405	29,207
SAL	36148	0	36148	0,000	29,408	1,740	4,137
CORR	36148	0	36148	0,000	0,541	0,082	0,053
PROF	36148	0	36148	2,410	6,110	4,079	0,462
Q	36148	0	36148	7619,084	62930,861	27587,501	10510,743
Hs	36148	0	36148	0,040	1,740	0,371	0,277
Tz	36148	0	36148	1,300	11,800	2,973	0,814

Resuspensión de sedimentos por una obra de dragado en el Río de la Plata.

Caso: Central de Ciclo Combinado (UTE), Punta del Tigre, San José.

Matriz de correlaciones (Pearson (n-1)):

Variabes	TEMP	TURB	SAL	CORR	PROF	Q	Hs	Tz
TEMP	1	-0,191	0,226	0,075	0,052	0,067	0,047	-0,091
TURB	-0,191	1	-0,267	0,060	0,412	0,116	0,515	0,118
SAL	0,226	-0,267	1	0,105	-0,014	-0,290	-0,040	-0,053
CORR	0,075	0,060	0,105	1	0,147	-0,066	0,109	0,017
PROF	0,052	0,412	-0,014	0,147	1	-0,001	0,650	0,166
Q	0,067	0,116	-0,290	-0,066	-0,001	1	-0,011	-0,001
Hs	0,047	0,515	-0,040	0,109	0,650	-0,011	1	-0,035
Tz	-0,091	0,118	-0,053	0,017	0,166	-0,001	-0,035	1

Los valores en negrita son diferentes de 0 con un nivel de significación $\alpha=0,05$

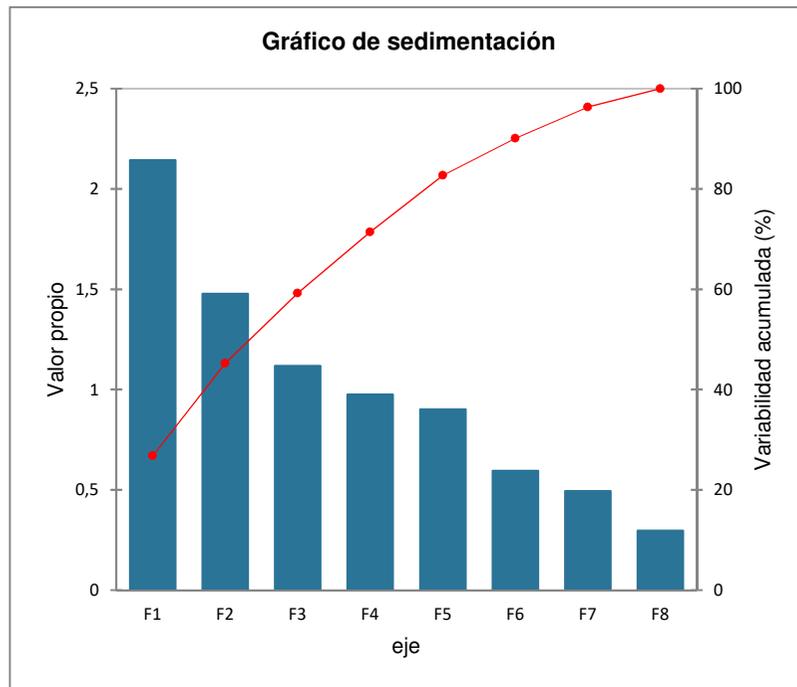
Análisis de Componentes Principales:

Valores propios:

	F1	F2	F3	F4	F5	F6	F7	F8
Valor propio	2,142	1,478	1,118	0,975	0,901	0,595	0,494	0,296
Variabilidad (%)	26,781	18,474	13,979	12,191	11,264	7,433	6,181	3,696
% acumulado	26,781	45,255	59,234	71,425	82,689	90,123	96,304	100,000

Resuspensión de sedimentos por una obra de dragado en el Río de la Plata.

Caso: Central de Ciclo Combinado (UTE), Punta del Tigre, San José.



Vectores propios:

	F1	F2	F3	F4	F5
TEMP	-0,075	0,429	0,590	0,329	-0,253
TURB	0,539	-0,178	-0,051	-0,114	0,058
SAL	-0,183	0,618	-0,123	-0,006	-0,202
CORR	0,129	0,352	-0,054	0,318	0,868
PROF	0,553	0,230	0,005	0,069	-0,183
Q	0,084	-0,411	0,611	0,363	0,073
Hs	0,568	0,209	0,122	-0,224	-0,114
Tz	0,135	-0,116	-0,493	0,769	-0,295

Resuspensión de sedimentos por una obra de dragado en el Río de la Plata.

Caso: Central de Ciclo Combinado (UTE), Punta del Tigre, San José.

Cargas factoriales:

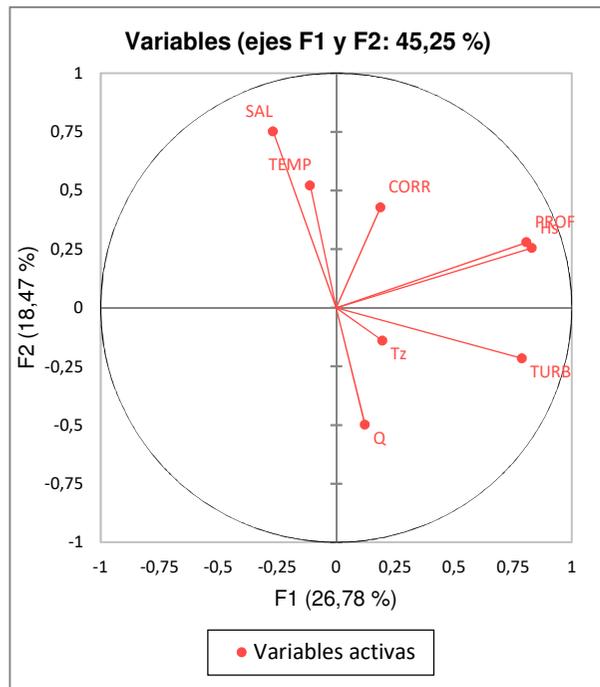
	F1	F2	F3	F4	F5
TEMP	-0,110	0,521	0,624	0,325	-0,241
TURB	0,790	-0,216	-0,054	-0,113	0,055
SAL	-0,268	0,751	-0,130	-0,006	-0,192
CORR	0,188	0,428	-0,057	0,314	0,824
PROF	0,809	0,279	0,006	0,068	-0,173
Q	0,122	-0,500	0,646	0,359	0,069
Hs	0,832	0,255	0,129	-0,221	-0,108
Tz	0,197	-0,141	-0,521	0,759	-0,280

Correlaciones entre las variables y los factores:

	F1	F2	F3	F4	F5
TEMP	-0,110	0,521	0,624	0,325	-0,241
TURB	0,790	-0,216	-0,054	-0,113	0,055
SAL	-0,268	0,751	-0,130	-0,006	-0,192
CORR	0,188	0,428	-0,057	0,314	0,824
PROF	0,809	0,279	0,006	0,068	-0,173
Q	0,122	-0,500	0,646	0,359	0,069
Hs	0,832	0,255	0,129	-0,221	-0,108
Tz	0,197	-0,141	-0,521	0,759	-0,280

Resuspensión de sedimentos por una obra de dragado en el Río de la Plata.

Caso: Central de Ciclo Combinado (UTE), Punta del Tigre, San José.



Resuspensión de sedimentos por una obra de dragado en el Río de la Plata.

Caso: Central de Ciclo Combinado (UTE), Punta del Tigre, San José.

10.1.6 Variables modificadas por VF

XLSTAT-Estudiante 2021.3.1.1151 - Análisis de Componentes Principales (ACP) - Comienzo: 27/04/2022 a las 21:21:20 / Final: 27/04/2022 a las 21:21:22

Tabla observaciones/variables: Libro = ACP_Original y Corr fondo.xlsx / Hoja = Vel fondo / Rango = 'Vel fondo'!\$J\$5:\$N\$36153 / 36148 filas y 5 columnas

Tipo de ACP: Correlación

Filtrar los factores Número máximo = 5

Estandarización: (n-1)

Tipo de biplot: Biplot de correlación / Coeficiente = Automático



Estadísticos descriptivos:

Variable	Observaciones	Obs. con datos perdidos	Obs. sin datos perdidos	Mínimo	Máximo	Media	Desv. típica
TEMP	36148	0	36148	7,864	28,030	17,462	4,783
TURB	36148	0	36148	0,000	393,579	42,405	29,207
SAL	36148	0	36148	0,000	29,408	1,740	4,137
Q	36148	0	36148	7619,084	62930,861	27587,501	10510,743
VF	36148	0	36148	0,004	2,370	0,138	0,088

Resuspensión de sedimentos por una obra de dragado en el Río de la Plata.

Caso: Central de Ciclo Combinado (UTE), Punta del Tigre, San José.

Matriz de correlaciones (Pearson (n-1)):

Variabes	TEMP	TURB	SAL	Q	VF
TEMP	1	-0,191	0,226	0,067	0,047
TURB	-0,191	1	-0,267	0,116	0,430
SAL	0,226	-0,267	1	-0,290	0,040
Q	0,067	0,116	-0,290	1	-0,063
VF	0,047	0,430	0,040	-0,063	1

Los valores en negrita son diferentes de 0 con un nivel de significación $\alpha=0,05$

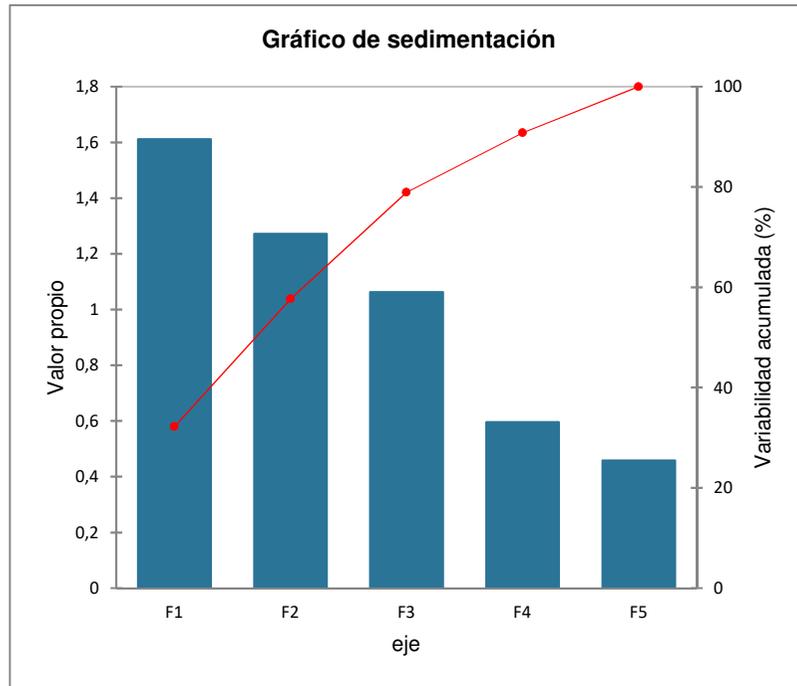
Análisis de Componentes Principales:

Valores propios:

	F1	F2	F3	F4	F5
Valor propio	1,611	1,272	1,062	0,596	0,459
Variabilidad (%)	32,222	25,441	21,248	11,917	9,172
% acumulado	32,222	57,663	78,911	90,828	100,000

Resuspensión de sedimentos por una obra de dragado en el Río de la Plata.

Caso: Central de Ciclo Combinado (UTE), Punta del Tigre, San José.



Vectores propios:

	F1	F2	F3	F4	F5
TEMP	-0,331	0,170	0,774	-0,462	0,220
TURB	0,638	0,295	0,030	0,039	0,709
SAL	-0,517	0,455	0,019	0,685	0,237
Q	0,293	-0,473	0,600	0,562	-0,123
VF	0,360	0,673	0,199	0,031	-0,614

Resuspensión de sedimentos por una obra de dragado en el Río de la Plata.

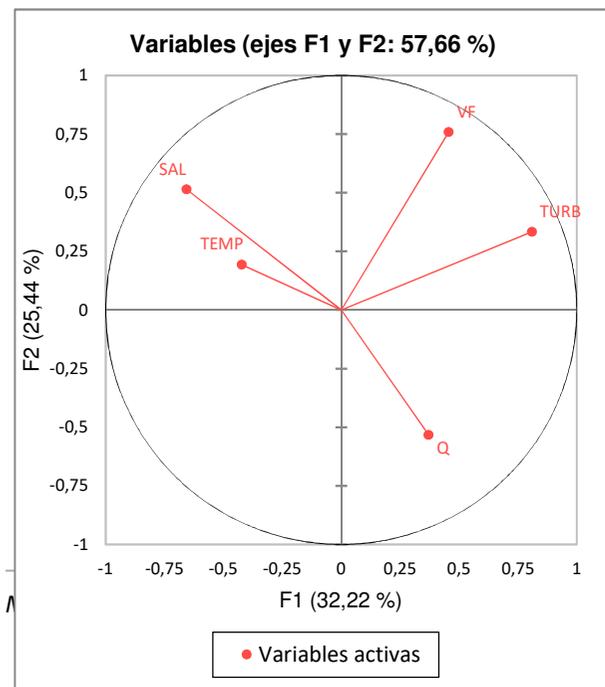
Caso: Central de Ciclo Combinado (UTE), Punta del Tigre, San José.

Cargas factoriales:

	F1	F2	F3	F4	F5
TEMP	-0,421	0,192	0,798	-0,356	0,149
TURB	0,810	0,333	0,031	0,030	0,480
SAL	-0,656	0,514	0,020	0,528	0,160
Q	0,372	-0,534	0,618	0,434	-0,083
VF	0,457	0,759	0,206	0,024	-0,416

Correlaciones entre las variables y los factores:

	F1	F2	F3	F4	F5
TEMP	-0,421	0,192	0,798	-0,356	0,149
TURB	0,810	0,333	0,031	0,030	0,480
SAL	-0,656	0,514	0,020	0,528	0,160
Q	0,372	-0,534	0,618	0,434	-0,083
VF	0,457	0,759	0,206	0,024	-0,416



10.2 Correlación entre los 4 puntos de monitoreo

10.2.1 Correlaciones de Pearson

XLSTAT-Estudiante 2021.3.1.1151 - Pruebas de correlación - Comienzo: 21/08/2021 a las 10:15:59 / Final: 21/08/2021 a las 10:16:02

Observaciones / Variables cuantitativas: Libro = 0_monitoreo Turbiedad y Aceites y Graas.xlsx / Hoja = turb vs corr / Rango = 'turb vs corr'!\$H\$3:\$K\$295 / 292 filas y 4 columnas

Tipo de correlación: Pearson



Estadísticos descriptivos

Estadísticos descriptivos:

Variable	Observaciones	Obs. con datos perdidos	Obs. sin datos perdidos	Mínimo	Máximo	Media	Desv. típica
1 (W)	292	0	292	5,560	305,000	51,013	37,549
2 (S)	292	0	292	3,000	324,000	50,379	37,782
3 E	292	0	292	3,080	325,000	50,520	38,490
4 EN	292	0	292	5,030	304,000	50,227	38,112

Matriz de correlaciones (Pearson):

Variables	1 (W)	2 (S)	3 E	4 EN
1 (W)	1	0,995	0,993	0,994
2 (S)	0,995	1	0,994	0,993
3 E	0,993	0,994	1	0,994
4 EN	0,994	0,993	0,994	1

Los valores en negrita son diferentes de 0 con un nivel de significación $\alpha=0,05$

10.2.2 Prueba de Kruskal-Wallis

XLSTAT-Estudiante 2021.3.1.1151 - Comparación de k muestras (Kruskal-Wallis, Friedman, ...) - Comienzo: 21/08/2021 a las 12:56:14 / Final: 21/08/2021 a las 12:56:52

Muestras: Libro = 0_monitoreo Turbiedad y Aceites y Graas.xlsx / Hoja = turb vs corr / Rango = 'turb vs corr'!\$1:\$3:\$L\$295 / 292 filas y 4 columnas

Nivel de significación (%): 5

valor-p: Valor-p asintótico



Estadísticos descriptivos

Estadísticos descriptivos:

Variable	Observaciones	Obs. con datos perdidos	Obs. sin datos perdidos	Mínimo	Máximo	Media	Desv. típica
1	292	0	292	5,560	305,000	51,013	37,549
2	292	0	292	3,000	324,000	50,379	37,782
3	292	0	292	3,080	325,000	50,520	38,490
4	292	0	292	5,030	304,000	50,227	38,112

Prueba de Kruskal-Wallis / Prueba bilateral:

K (Valor observado)	0,380
K (Valor crítico)	7,815
GL	3

Resuspensión de sedimentos por una obra de dragado en el Río de la Plata.

Caso: Central de Ciclo Combinado (UTE), Punta del Tigre, San José.

valor-p (unilateral)	0,944
alfa	0,050

Se ha utilizado una aproximación para calcular el valor-p.

Interpretación de la prueba:

H0: Las muestras vienen de la misma población.

Ha: Las muestras no vienen de la misma población.

Puesto que el valor-p calculado es mayor que el nivel de significación $\alpha=0,05$, no se puede rechazar la hipótesis nula H0.

10.3 Comparación de periodos con y sin obra

10.3.1 Prueba t de -Student

XLSTAT-Estudiante 2021.3.1.1151 - Pruebas t y z para dos muestras - Comienzo: 29/08/2021 a las 12:27:07 / Final: 29/08/2021 a las 12:27:08

Muestra 1: Libro = Para OBRA vs SIN.xlsx / Hoja = TURB Hyundai vs FING / Rango = 'TURB Hyundai vs FING'!\$B\$2:\$B\$27359 / 27357 filas y 1 columna

Muestra 2: Libro = Para OBRA vs SIN.xlsx / Hoja = TURB Hyundai vs FING / Rango = 'TURB Hyundai vs FING'!\$C\$2:\$C\$11823 / 11821 filas y 1 columna

Diferencia supuesta (D): 0

Nivel de significación (%): 5

Varianzas de la poblaciones para la prueba t: Suponer igualdad



Estadísticos descriptivos

Estadísticos descriptivos:

Resuspensión de sedimentos por una obra de dragado en el Río de la Plata.

Caso: Central de Ciclo Combinado (UTE), Punta del Tigre, San José.

Variable	Observaciones	Obs. con datos perdidos	Obs. sin datos perdidos	Mínimo	Máximo	Media	Desv. típica
Con obra	27357	0	27357	0,000	393,579	44,606	29,459
sin obra	11821	0	11821	0,243	239,359	38,152	31,530

Prueba t para dos muestras independientes / Prueba bilateral:

Intervalo de confianza para la diferencia entre las medias al 95%:

[5,805; 7,104]

Diferencia	6,455
t (Valor observado)	19,483
t (Valor crítico)	1,960
GL	39176
valor-p (bilateral)	<0,0001
alfa	0,050

Interpretación de la prueba:

H0: La diferencia entre las medias es igual a 0.

Ha: La diferencia entre las medias es diferente de 0.

Puesto que el valor-p computado es menor que el nivel de significación $\alpha=0,05$, se debe rechazar la hipótesis nula H0, y aceptar la hipótesis alternativa Ha.

Resuspensión de sedimentos por una obra de dragado en el Río de la Plata.

Caso: Central de Ciclo Combinado (UTE), Punta del Tigre, San José.

10.3.2 Prueba de Mann-Whitney

XLSTAT-Estudiante 2021.3.1.1151 - Comparación de dos muestras (Wilcoxon, Mann-Whitney, ...) - Comienzo: 29/08/2021 a las 11:55:34 / Final: 29/08/2021 a las 11:55:36

Muestra 1: Libro = Para OBRA vs SIN.xlsx / Hoja = TURB Hyundai vs FING / Rango = 'TURB Hyundai vs FING'!\$B\$2:\$B\$27359 / 27357 filas y 1 columna

Muestra 2: Libro = Para OBRA vs SIN.xlsx / Hoja = TURB Hyundai vs FING / Rango = 'TURB Hyundai vs FING'!\$C\$2:\$C\$11823 / 11821 filas y 1 columna

Diferencia supuesta (D): 0

Nivel de significación (%): 5

valor-p: Valor-p exacto



Estadísticos descriptivos:

Variable	Observaciones	Obs. con datos perdidos	Obs. sin datos perdidos	Mínimo	Máximo	Media	Desv. típica
Con obra	27357	0	27357	0,000	393,579	44,606	29,459
sin obra	11821	0	11821	0,243	239,359	38,152	31,530

Resuspensión de sedimentos por una obra de dragado en el Río de la Plata.

Caso: Central de Ciclo Combinado (UTE), Punta del Tigre, San José.

Prueba de Mann-Whitney / Prueba unilateral a la derecha:

U	190293782,500
U (estandarizado)	27,834
Valore esperado	161693548,500
Varianza (U)	1055831536529,550
valor-p (unilateral)	<0,0001
alfa	0,050

El valor-p exacto no ha podido calcularse. Se ha utilizado una aproximación para calcular el valor-p.

Interpretación de la prueba:

H0: La diferencia de posición entre las muestras es igual a 0.

Ha: La diferencia de posición entre las muestras es superior a 0.

Puesto que el valor-p computado es menor que el nivel de significación $\alpha=0,05$, se debe rechazar la hipótesis nula H0, y aceptar la hipótesis alternativa Ha.