

UNIVERSITAT POLITÈCNICA DE VALÈNCIA

ESCOLA POLITECNICA SUPERIOR DE GANDIA

Master en Eval. Amb. Ecosistemas marinos y Cost.



UNIVERSITAT
POLITÈCNICA
DE VALÈNCIA



ESCOLA POLITÈCNICA
SUPERIOR DE GANDIA

**“Simulación de un emisario submarino
a escala de laboratorio para la
observación de los procesos físicos de
dilución en el campo cercano”**

TRABAJO FINAL DE MASTER

Autor/a:
Carlos Barciela Segura

Tutor/a:
Víctor Sánchez Morcillo

GANDIA, 2019

Agradecimientos

En primer lugar, agradecerle a mi director, Víctor Sánchez, la confianza que depositó en mí al ofrecerme este proyecto, en el que ninguno teníamos experiencia previa, pero que conseguimos sacar adelante gracias a tu ayuda y apoyo. Por tu atención a los detalles y a esa forma de enfocar todo de una forma práctica y amplia que tienes y que me sacó siempre de las encrucijadas que se fueron presentando con el experimento. Por todo ello, no tengo más que agradecimientos.

A Miguel Rodilla y Blanca Feliu por su desinteresada ayuda y por el “feedback” que me aportaron durante el todo el proceso, ambos fueron cruciales. Además sin ellos no habría sido posible visitar el emisario, como patronos, guías y ante todo compañeros de buceo. En esta tarea no me puedo olvidar de Fabián, Alberto y Silvia que también me acompañaron a realizar las inmersiones; excelentes buzos y mejores compañeros.

A Ángela por apoyarme y explicarme cada duda que he tenido con las imágenes. Por disfrutar como yo de la maqueta y echarme una mano en el laboratorio. Ojalá compartamos más proyectos.

A Irene que más que una compañera ha sido una amiga y decir eso se queda corto. Por toda la ayuda que me has prestado, por acordarte de mí cada vez que te acuerdas de hacer el mundo mejor, por todos los días dulces, gracias.

A Fabián, de nuevo, porque hacer este camino juntos ha sido realmente inmejorable y simplemente se haría eterno decir por qué.

A Carlota porque a pesar de todas las cosas que nos han pasado siempre estamos ahí el uno para el otro y cuando nos perdemos sabemos cómo encontrarnos en el mar.

A mis padres porque siempre me han animado y no se han desanimado ellos por el camino, confiando en mí y dándome la oportunidad de estudiar cada vez que he querido hacerlo. Rosa, no te diste por vencida con mis matemáticas y al final he acabado haciendo un trabajo de física de fluidos; parece increíble. Santiago, sin todo lo que me has enseñado, que es tan vasto que abarca desde mi capacidad para amar el mar hasta poder leer los “papers”, no me imagino el camino recorrido hasta aquí. Gracias a los dos.

Resumen

El Mar Mediterráneo es un punto caliente del planeta en cuanto a biodiversidad, pero también en cuanto a presión antropogénica y a los problemas que surgen de esta situación. En este contexto, uno de los mayores impactos es el que produce la introducción en el medio marino de aguas residuales urbanas, si no se realiza de forma apropiada. Para minimizar los efectos negativos de los vertidos, estos se realizan a través de emisarios submarinos. Dada la complejidad de estas estructuras en cuanto a su funcionamiento e implantación así como la importancia de su buen rendimiento, se ha simulado el emisario de Gandía, para observar los procesos físicos que intervienen en la dilución de agua residual. Emplear un emisario de referencia para escalar las magnitudes tiene la ventaja de poder comparar la maqueta con el emisario real para perfeccionar el experimento y tiene como objetivo poder estudiar el estado y la calidad del emisario actual. Para ello se parte del modelo más simple posible añadiendo diferentes niveles de complejidad tanto en el diseño del tramo difusor como en las condiciones de la columna de agua (estratificación) y en las condiciones de forzamiento (viento). En estos diferentes escenarios se han empleado diferentes números de Froude (coeficiente que indica el carácter turbulento de un fluido), de cuyo valor depende el comportamiento del efluente expulsado.

Palabras clave: emisario submarino, modelo a escala, número de Froude, oceanografía, diseño experimental, dinámica de fluidos, vertidos urbanos.

Abstract

The Mediterranean sea it's a biodiversity hotspot in the planet, but also as regards of anthropogenic pressure and the problems arising with this situation. In this context, one of the most significant impacts is the one that is produced when the urban sewage waters are introduced in the marine environment, if it is not done properly. In order to minimize the consequences of discharges, these are made through submarine outfalls. Given the complexity of these structures in terms of operation and construction as well as the importance of a good performance, a scale model has been developed a simulation the submarine outfall of Gandía-La Safor for the purpose of observe the physical processes which take part in the wastewater dilution. Using a reference outfall to scale the magnitudes has the advantage of being able to compare the model with the real outfall for the model improvement and has the objective of being able to study the current outfall condition. For this, the start off is the simplest model, adding different levels of complexity, both the design of the port and water column conditions such as stratification or forcing conditions like the wind. In those different scenarios the model will be tested at different Froude numbers (turbulence indicator coefficient), whose value depend the effluent behaviour.

Keywords: submarine outfall, scale model, Froude number, oceanography, experimental design, fluid dynamics, wastewater.

Índice:

1. INTRODUCCIÓN:	1
1.1. Contaminación y polución:	1
1.2. Emisarios submarinos:	2
1.3. Motivación:	4
1.4. Marco legal:	8
1.5. Objetivos:	13
2. ZONA DE ESTUDIO:	14
2.1. Red de saneamiento de Gandía-La Safor:	14
2.2. EDAR de Gandía-La Safor:	15
2.3. Emisario submarino de Gandía. Obtención de datos:	16
2.3.1. Informe de la primera inmersión:	17
2.3.2. Informe de la segunda inmersión:	21
3. FUNDAMENTO TEÓRICO:	23
3.1. Turbulencia:	24
3.2. Teorema de Bernouilli:	27
3.3. Sobre la estratificación y las ondas internas:	30
3.4. Otro proceso de mezcla turbulenta: cizalla vertical	33
4. DISEÑO EXPERIMENTAL:	34
5. RESULTADOS Y DISCUSIÓN:	38
5.1. Ensayos con el modelo simple: $F \approx 0,80$:	38
5.2. Ensayos con el modelo simple $F \approx 2,2$:	41
5.3. Ensayos con el modelo simple: $F > 3,6$:	45
5.4. Ensayos con el modelo completo:	48
6. CONCLUSIONES:	55
6.1. Sobre las inmersiones:	55
6.2. Sobre los procesos observados en el tanque:	56
6.3. Sobre el propio experimento:	57
6.4. Ideas de futuro:	58
7. BIBLIOGRAFÍA:	60

1. INTRODUCCIÓN:

La primera vez que navegué sobre el emisario lo que más me llamó la atención además del color del agua, que contrastaba con el de otras zonas que había visitado del Mediterráneo, fue ver la surgencia, de forma circular, en la superficie. Esa parcela de agua parecía no estar afectada por el viento y el oleaje como el mar que la rodeaba por lo que debía de ser un líquido con propiedades muy diferentes. Esto me hizo dudar sobre si el emisario podría verter de una forma más eficiente.

1.1. Contaminación y polución:

Desde el origen de la historia, el mar se ha empleado como sumidero de residuos debido a la falsa creencia de un infinito poder de recuperación o propiedades depurativas. También desde tiempos antiguos existen referencias de los primeros sistemas de alcantarillado. Normalmente los residuos urbanos han ido a parar a diferentes cuerpos de agua, ríos, lagos y mares. Estos impactos han sido soportados durante mucho tiempo sin que las consecuencias fuesen perceptibles. Sin embargo, cuando se produce el aumento de población exponencial que ha sucedido durante los últimos 200 años también los vertidos aumentan exponencialmente. En el caso de la costa valenciana, como en todo el Mediterráneo, se produce un aumento de población puntual en los meses de verano debido al turismo de sol y playa. Esto provoca de forma general que algunas estructuras públicas no se puedan diseñar de forma eficiente como se explicará más adelante.

Según el Grupo de Expertos de los Aspectos Científicos de la Polución Marina (GESAMP) en el artículo 1.4 de la Convención de la Ley del Mar de las Naciones Unidas (UNCLOS) de 1982, "La contaminación es la introducción directa o indirecta de sustancias o energía en el medio marino (incluyendo estuarios) por acción del ser humano, provocando efectos nocivos como daño a los recursos vivos, peligro para la salud humana, obstáculos a la realización de las actividades marítimas, pérdida de calidad y del uso recreativo del agua marina" (UNCLOS 1982). La introducción de compuestos químicos en un hábitat o en los organismos que lo ocupan debido a causas no naturales en una concentración mayor que la normal se define como contaminación. Cuando esto produce un impacto dañino al ecosistema y a los organismos, interfiere con las actividades humanas de forma negativa (salud, comodidad, valor de la propiedad, etc.) se define como polución. También se incluyen los cambios físicos que alteren flujos de radiación o energía (luz, calor, radioactividad, sonido, etc.) así como la

introducción de especies invasoras (Clark, 2011). La polución marina es un concepto muy amplio desde el punto de vista del tipo de descargas, de la naturaleza del contaminante y de los efectos adversos producidos. Se puede clasificar la polución de distintas formas dependiendo de su composición fisicoquímica, estado físico, persistencia en el medio y procedencia. En general un vertido urbano está compuesto principalmente por materia orgánica fecal (incluyendo organismos patógenos) que se suele medir mediante la demanda biológica de oxígeno (DBO) y la demanda química de oxígeno (DQO). Además de los organismos y compuestos orgánicos también están presentes sólidos en suspensión, los cuales incluyen microplásticos (Felis 2018), y sustancias tóxicas.

No se suele destacar que este tipo de vertido puede producir también contaminación física de dos formas, (ambas presentes en el emisario de Gandía): se aumenta la temperatura y se reduce la luz. El agua residual, en general, está más caliente que el agua del mar. Esa diferencia de calor, pero sobretodo de salinidad entre ambas aguas, hace que se pueda acumular en la capa superior el efluente, creándose una barrera física dentro de la columna de agua que afecta a gases y nutrientes. Si este efluente no se diluye lo bastante y/o no tiene suficiente claridad también se produce una barrera para la luz.

Este trabajo no se centra en los agentes contaminantes sino en la forma en que estos se introducen en el medio, sin embargo, conocer la naturaleza del vertido es importante para un buen diseño así como el conocimiento de la zona es importante para proteger los lugares con mayor valor, puesto que el objetivo es producir el menor impacto nocivo al medio marino e incluso generar efectos positivos al menor coste posible (Pearson and De Fraja Frangipane, 1975).

1.2. Emisarios submarinos:

El presente trabajo se centra en el funcionamiento de los emisarios submarinos, en concreto en las descargas del efluente al medio marino y los procesos físicos que intervienen en la dilución de las aguas residuales, tratando de reproducir una de estas estructuras a escala en el laboratorio.

Un emisario submarino no es más que un conducto cerrado o tubería sumergida que discurre generalmente desde una depuradora hasta un punto del mar lejano a la costa y a una cierta profundidad (figura 1), cuya función es recoger toda el agua tratada para

verterla al medio marino (aunque en ocasiones se vierta agua sin depurar por algún tipo de problema técnico). Según el artículo 1.5.a.i. del Convenio UNCLOS, un vertido es cualquier deposición deliberada de desechos u otros materiales de embarcaciones, aviones, plataformas u otras estructuras hechas por el hombre en el mar (UNCLOS 1982). Como se ha hablado sobre el poder depurativo del mar hay que destacar que sí que tiene mecanismos para soportar este impacto si se hace de forma efectiva. De hecho, la idea de diluir bien el vertido dada su composición se basa en la captación de los nutrientes y la extinción de los patógenos en el agua marina (Feitosa et al., 2013).

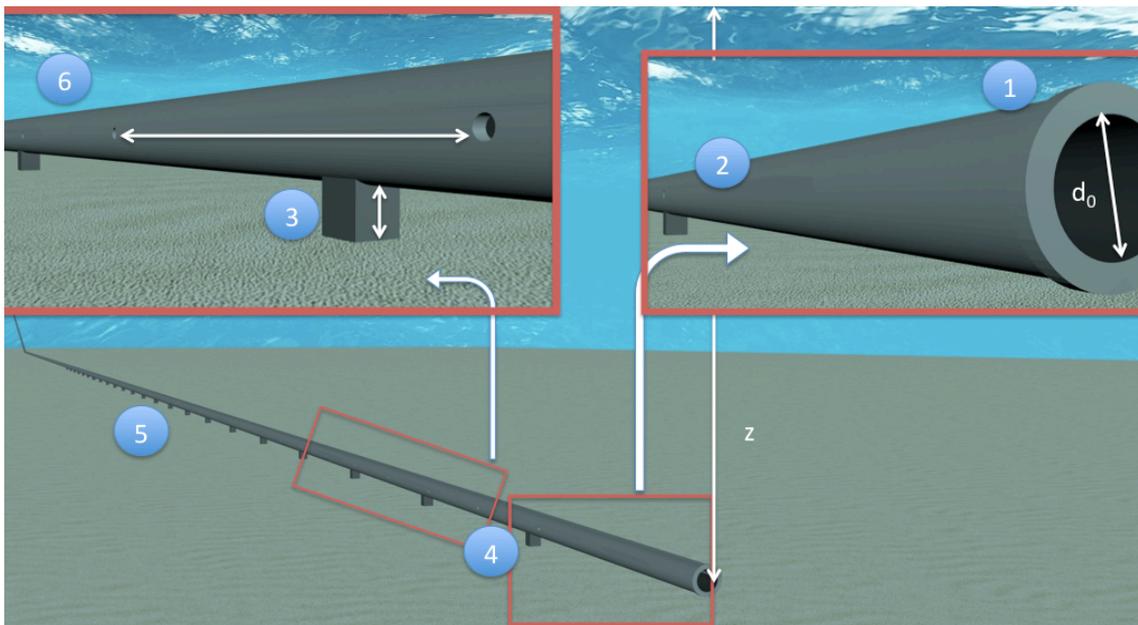


Figura 1. Representación 3D del emisario de Gandía con los datos tomados en las inmersiones (sección 2.3.) con el programa 3dsMax con las principales medidas y componentes: 1) abertura principal, 2) primer difusor lateral, 3) pilar, 4) tramo difusor, 5) tramo sumergido, 6) difusores laterales.

Para transportar el agua depurada hasta el punto escogido para su vertido debe ser impulsada. El movimiento se produce por medio de bombas conectadas al emisario en su tramo emergido. Esto se debe a que es necesaria una velocidad mínima para evitar el mal funcionamiento del tramo sumergido del emisario. En primer lugar, la velocidad mínima se calcula en el diseño para que se produzca el arrastre de los sedimentos y burbujas de gas que son transportados (ver sección 1.4.). En segundo lugar, esta velocidad combate la intrusión salina; esto es algo importante ya que la entrada de agua al tubo debilita su integridad y permite, sumado a una velocidad deficiente, la colonización del tubo por organismos sésiles y películas bacterianas, fenómeno conocido como *biofouling*. Cabe decir que existe otro tipo de *fouling* artificial que incluye

redes, aparejos, sistemas de fondeo y otros materiales que pueden afectar el funcionamiento del emisario (Grace, 2007).

En el final de este suele haber unos difusores previos a la abertura final (y de menor tamaño) que ayudan a que el agua residual se diluya mejor. Se entiende por difusores estructuras de un diámetro relativamente pequeño para el caudal que circula por ellos y que provoca que el líquido expulsado se diluya mejor al ser más turbulento. Esta parte del emisario se llama tramo difusor. Existen diferentes diseños tanto de esta sección como de los propios difusores, que con los años se han ido perfeccionando. Aunque existen emisarios muy complejos en sus estructuras estos suelen ser los más modernos. Los más antiguos son un tubo simple abierto en su final. En el caso del emisario de Gandía, además se añaden 19 difusores laterales alternos que simplemente son un agujero en el tubo. Sin embargo, expulsar agua por los primeros difusores puede causar que el caudal siguiente no tenga una velocidad adecuada. Al final, la importancia de la velocidad en el buen funcionamiento de un emisario queda patente al tener una doble función: evitar la obstrucción del emisario y los difusores por causa del sedimento o de la colonización del tubo e incidir de forma directa en la efectividad con la que el agua residual se diluye en el agua de mar. En este experimento, se intentará hacer ver la importancia que supone una primera dilución efectiva. Se entiende por primera dilución la que se produce en cuanto el agua residual se vierte debido a procesos de turbulencia y difusión.

Normalmente los estudios sobre el funcionamiento de este tipo de estructuras se dividen entre experimentos de laboratorio, experimentos de campo y modelos de simulación. Los primeros se suelen emplear para calibrar los parámetros de un modelo mientras que los segundos son útiles para comprobar la validez de las predicciones de las simulaciones. El problema es que los estudios de campo requieren que el emisario esté construido, así como inyectar los trazadores de forma continua en el efluente y realizar mediciones a diferentes distancias del punto de descarga, lo que supondría un incremento del coste (Dhanak and Xiros, n.d.). En este experimento a escala de laboratorio no se buscarán parámetros de un modelo, sino que se tratará de reproducir con la mayor fiabilidad posible el vertido de un emisario submarino para observar y describir los procesos que se producen.

1.3. Motivación:

El primer motivo para realizar este trabajo es el elevado coste que suponen tanto las

obras de un emisario como los estudios de campo sobre el funcionamiento de los mismos. El propósito de este trabajo es proponer y desarrollar un método experimental que permita, a pequeña escala, simular el funcionamiento de un diseño dado de tramo difusor de una forma visual. Además de un recurso visual orientativo y divulgativo, con este experimento se pretende conseguir la simplicidad suficiente para que pueda servir también como recurso académico.

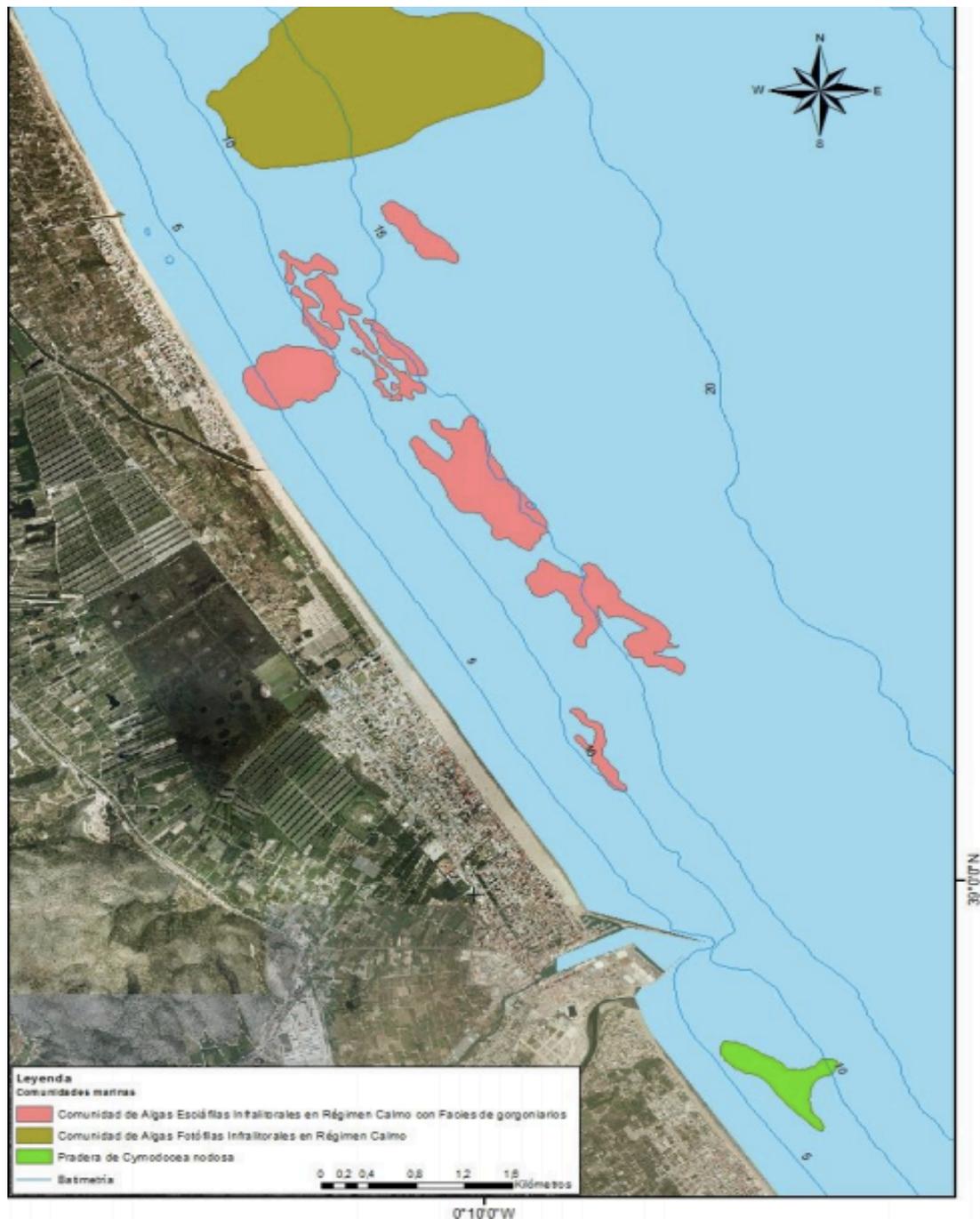


Figura 2. Mapa costero de las comunidades bentónicas presentes frente al Grau de Gandía (Feliu Tena, 2016).

El valor ecológico es otra de las justificaciones en el interés del estudio. El Mar Mediterráneo, considerado el mar interior de mayor tamaño, ocupa un 0,82 % de la superficie y un 0,32 % del volumen de los océanos y es un punto caliente de biodiversidad del planeta. Se estima que cerca de 8.500 especies marinas lo habitan, muchas de las cuales son endémicas. Se estima que entre el 4 y el 18% de la biodiversidad mundial proviene de este mar en cuanto a especies marinas se refiere (Bianchi y Morri, 2000). Destacan ecosistemas únicos como las praderas de fanerógamas marinas, especialmente de *Posidonia oceanica*, o los arrecifes de coralígeno, que son a su vez puntos de biodiversidad dentro del propio Mediterráneo. En Gandía las manchas de fanerógamas hoy en día son muy pequeñas; sin embargo, sí que existen diversos arrecifes de coralígeno que discurren paralelos a la costa a diferentes cotas de profundidad (figura 2).

La introducción de contaminantes en el medio provoca una alteración del mismo que puede generar impactos negativos en estas comunidades. Dada la carga que lleva el efluente de una Estación Depuradora de Aguas Residuales (EDAR, en adelante), la calidad del agua se ve alterada tanto en turbidez como en concentración de nutrientes. Esto, para los dos ecosistemas nombrados, se traduce en menor disponibilidad de luz para realizar la fotosíntesis y mejores condiciones para especies oportunistas de colonizar el espacio, así como un riesgo de eutrofización (Peres y Picard, 1975). En el caso de los arrecifes los efectos son muy variados, ya que son especialmente sensibles a los tres principales componentes de los vertidos. Los nutrientes generan aumento de producción primaria que favorece a las macroalgas y a los organismos filtradores generando la competencia por la luz y por el espacio, los sedimentos pueden llegar a ser letales y las sustancias tóxicas alteran las funciones vitales de los corales (Pastorok and Bilyard, 1985). También se han estudiado los efectos nocivos que producen en las comunidades de algas o la mejora que se produce con la implementación de la calidad de la descarga, así como que las algas de zonas más profundas son más vulnerables que las que ocupan las zonas someras (Soltan et al., 2001). Además, las comunidades de fitoplancton se ven alteradas, tanto en su composición como en abundancia. Cuando la descarga masiva de nutrientes altera la relación N:P, puede llegar a producir eventos no deseados como son floraciones algales o "blooms" de especies de fitoplancton tóxicas, conocidos como mareas rojas (Hodgkiss and Ho, 1997), (Marasović et al., 1991). Esta misma alteración de la ratio N:P hace que algunas de estas especies sean aún más tóxicas (Anandon et al., 2005).

La descarga no solo afecta directamente a organismos fotosintéticos. También los peces y las comunidades que conforman pueden sufrir variaciones en su composición y en su abundancia, y aunque la pesca es una mayor amenaza para ellos, no se puede obviar el efecto de los vertidos (Guidetti et al., 2002, Guidetti et al., 2003). En general, la zona donde está situado el emisario está desierta y considerada como zona sin riesgo de eutrofización, por lo que el aporte de nutrientes que importa al mar hace que haya más cantidad de vida que la esperada en la zona. Las comunidades bentónicas también se resienten de los vertidos; sin embargo, este efecto suele quedar restringido al punto de descarga (Swartz et al., n.d.).

Gandía es una localidad fuertemente ligada al turismo de sol y playa. Cuando llega la temporada alta la población aumenta de forma considerable. Sin embargo, sus aguas no siempre están disponibles, por su merma de calidad, para uso recreativo. Ese aumento de población desborda la capacidad de la depuradora que en ocasiones no consigue verter toda el agua con calidad suficiente. Otro escenario desfavorable se da cuando se producen lluvias torrenciales, que generan un volumen de agua demasiado grande para que la depuradora la pueda tratar, aunque para evitar esto existen una serie de estructuras [sección 2.1.]. Estos problemas quedan patentes observando las numerosas veces que se ha cerrado el acceso al mar y que ha trascendido a la prensa. En 2007 aparece en varios medios la noticia de contaminación por una concentración de bacterias fecales mayor de la normal (País, 2007). En 2008 ya existía conciencia política sobre este problema con la contaminación (Escrivá, 2008), y así quedó demostrado por el hecho de que las playas de Venecia y Rafalcaid se mantuvieron cerradas y se hacía eco la prensa (Berzosa, 2008). En las inmediaciones de dichos arenales, concretamente en la desembocadura del río Serpis, aparecen en 2014 acumulaciones de peces muertos (Las Provincias, 2014). El nivel de contaminación de nuevo provoca el cierre a los usuarios. También en el año 2016 se tienen que cerrar las mismas playas por motivos similares (EFE, 2016) aunque en este mismo año el ayuntamiento se compromete a realizar actuaciones para mejorar la situación (Orpegui, 2016).

Todos estos documentos de prensa digital ponen de manifiesto la relevancia de un problema que afecta al Municipio de Gandía, ya que la misma publicidad negativa que recibe con las noticias es una amenaza a la promoción turística. Para tratar de paliar esta situación, en los últimos años se han realizado varias obras de mejora en la zona de la desembocadura del Serpis, por donde transcurre el emisario submarino.

1.4 Marco legal:

A continuación, se presenta una revisión de las principales leyes sobre vertidos en el medio marino clasificadas según su escala territorial.

Se puede considerar que, de todas ellas, la única que se refiere a las características de un emisario es la Orden del BOE de 1993. En ella se establece que los factores de dilución inicial deben ser de 1:80 (1:100 donde no exista estratificación o su ligereza haga que la mezcla alcance la superficie) durante el 95% del tiempo. La distancia mínima debe ser al menos 500 metros. Para evitar la sedimentación se propone una velocidad mínima entre 0,6 y 0,8 m/s al menos una vez al día. También existen consideraciones sobre el tamaño de los tramos y los difusores, sobre las inspecciones a realizar, tipos de muestras, frecuencias de muestreo, etc. Nótese que uno de los requisitos que indica la ley es que para cada difusor el valor del número de Froude (ver sección 3.1) ha de ser mayor que la unidad.

Tabla 1. Principales parámetros medidos por ley del efluente de una EDAR (modificada del BOE núm. 312, de 30 de diciembre de 1995).

Parámetros	Concentración	Porcentaje mínimo de reducción (1)
Demanda bioquímica de oxígeno (DBO 5 a 20 °C) sin nitrificación (2).	25 mg/l O ₂	70-90 40 de conformidad con el apartado 3 del artículo 5 R.D.L. (3).
Demanda química de oxígeno (DQO).	125 mg/l O ₂	75
Total de sólidos en suspensión.	35 mg/l (4) 35 de conformidad con el apartado 3 del art. 5 R.D.L. (más de 10.000 h-e) (3). 60 de conformidad con el apartado 3 del art. 5 R.D.L. (de 2.000 a 10.000 h-e) (3).	90 (4) 90 de conformidad con el apartado 3 del art. 5 R.D.L. (más de 10.000 h-e) (3). 70 de conformidad con el apartado 3 del art. 5 R.D.L. (de 2.000 a 10.000 h-e) (3).

La calidad del agua, según su uso está legislada en diferentes Reales Decretos. La calidad del agua de baño se establece en 1988 y se revisa en 2007 a partir de las directrices del Parlamento Europeo. Entre otras cosas se clasifican las aguas según sus características para, una vez analizadas, conocer su calidad. Los análisis se basan en el recuento de enterococos y *E.coli*. Esto análisis son más permisivos con las aguas continentales que con la franja costera.

Por último, destacar también el Real Decreto de 1995 y su desarrollo del año 1996 sobre los requisitos mínimos de calidad que debe superar un vertido de agua residual urbana procedente de una planta de tratamiento. Se pueden añadir análisis de nitrógeno y fósforo a los parámetros de la tabla 1, cuando el agua receptora del vertido se considera sensible a sufrir procesos de eutrofización.

Legislación internacional:

- Protocolo relativo a la Protección del Mar Mediterráneo contra la contaminación de origen terrestre (Atenas, 1980).
- Convenio para la Protección del Mar Mediterráneo contra la Contaminación (Barcelona, 1976).
- Convenio para la protección del medio ambiente marino del Atlántico Nordeste (Oslo-París, 1993).
- Convenio sobre la prevención de la contaminación del mar por vertimiento de desechos y otras materias (Londres, 1972). Modificado en 1996.

Legislación de Europa (derecho comunitario):

- Directiva del consejo, 76/160/CEE, del 8 de diciembre de 1975, referente a la calidad de aguas de baño.
- Directiva del consejo, 76/464/CEE, de 4 de mayo de 1976, referente a la contaminación producida por ciertas sustancias peligrosas vertidas en el medio acuático de la Comunidad y como desarrollo o modificación de la anterior:

* Directiva del consejo, 82/176/CEE, de 22 de mayo de 1982, referente a los valores límite y los objetivos de calidad para los vertidos de mercurio del sector de la electrolisis de los cloruros alcalinos.

* Directiva del consejo, 83/513/CEE, de 26 de septiembre de 1983, referente a los valores límites y objetivos de calidad para los vertidos de cadmio.

* Directiva del consejo, 84/91/CEE, de 9 de octubre de 1984, referente a los valores límites y los objetivos de calidad de los vertidos de hexaclorociclohexano.

* Directiva del consejo, 84/156/CEE, de 8 de marzo de 1984, referente a los valores límites y los objetivos de calidad de los vertidos de mercurio de otros sectores que el de la electrolisis de cloruros alcalinos.

* Directiva del consejo, 86/280/CEE, de 12 de junio de 1986, relativa a los valores límite y los objetivos de calidad para los residuos de determinadas sustancias peligrosas comprendidas en la lista I del Anexo de la Directiva 76/464/CEE.

* Directiva del consejo, 86/347/CEE, de 16 de junio de 1988, por la que se modifica el Anexo II de la Directiva 86/280/CEE relativa a los valores límite y los objetivos de calidad para los residuos de determinadas sustancias peligrosas comprendidas en la lista I del Anexo de la Directiva 76/464/CEE.

* Directiva del consejo, 90/415/CEE, de 27 de julio de 1990, por la que se modifica el Anejo II de la Directiva 86/280/CEE relativa a los valores límite y los objetivos de calidad para los residuos de determinadas sustancias peligrosas comprendidas en la lista I del Anejo de la Directiva 76/464/CEE.

- Directiva del consejo, 79/923/CEE, de 30 de octubre de 1979 sobre la calidad requerida para las aguas de cultivos de moluscos.
- Directiva del consejo, 91/27/CEE, de 21 de mayo de 1991 sobre el tratamiento de las aguas residuales urbanas.
- **Directiva, del Consejo, 2006/7/CE de 15 de febrero de 2006, relativa a la gestión de la calidad de las aguas de baño**

Legislación de España (estatal):

- Ley de Costas 22/1988, de 28 de Julio, (B.O.E.-nº 181, de 29 de Julio de 1988).
- Real Decreto 1471/1989, de 1 de diciembre, por el que se aprueba el Reglamento General para desarrollo y ejecución de la Ley 22/1988, de 28 de Julio, de Costas (B.O.E. nº 297, de 12 de diciembre de 1989).
- Real Decreto 734/1988, de 1 de Julio, por el que se establecen normas de calidad de las aguas de baño (B.O.E. nº 167, de 13 de Julio de 1988).
- Corrección de errores del Real Decreto 734/1988 de 1 de Julio, por el que se establecen normas de calidad de las aguas de baño (B.O.E. nº 169, de 15 de Julio de 1988).
- Real Decreto 258/1989, de 10 de marzo, por el que se establece la normativa general sobre vertidos de sustancias peligrosas desde tierra al mar (B.O.E. nº 64, de 16 de marzo de 1989).
- Orden de 31 de octubre de 1989, por la que se establecen normas de emisión, objetivos de calidad, métodos de medida de referencia y procedimiento de control relativos a determinadas sustancias peligrosas contenidas en los vertidos desde tierra al mar (B.O.E. nº 271, de 11 de noviembre de 1989).
- Real Decreto 345/1993, de 5 de marzo, por el que se establecen las normas de calidad de las aguas y de la producción de moluscos y otros invertebrados marinos vivos.
- **Orden de 13 de Julio de 1993, por la que se aprueba la "Instrucción para el proyecto de conducciones de vertido desde tierra al mar".**
- Resolución de 28 de abril de 1995 (Secretaría de Estado de Medio Ambiente y Vivienda), por la que se publica el Acuerdo del Consejo de Ministros de 17 de febrero de 1995, que aprueba el Plan Nacional de Saneamiento y Depuración de Aguas Residuales (1995-2005) (BOE núm. 113, de 12 de mayo de 1995).

- Real Decreto 484/1995, de 7 de abril, sobre medidas de regularización y control de vertidos (BOE núm. 95, de 21 de abril de 1995; rectific. BOE núm. 114, de 13 de mayo de 1995). Regula los vertidos a ríos.
- Real Decreto-Ley 11/1995, de 28 de diciembre, por el que se establecen las normas aplicables al tratamiento de las aguas residuales urbanas (BOE núm. 312, de 30 de diciembre de 1995) y Real Decreto 509/1996 que lo desarrolla.
- Real Decreto 261/1996, de 16 de febrero, sobre protección de las aguas contra la contaminación producida por los nitratos procedentes de fuentes agrarias (BOE núm.61, de 11 de marzo de 1996).
- Ley 5/2002, de 3 de junio, sobre vertidos de aguas residuales industriales a los sistemas públicos de saneamiento (BOE» núm. 170, de 17 de julio de 2002).
- **Real Decreto 1341/2007, de 11 de octubre, sobre la gestión de la calidad de las aguas de baño (BOE núm. 257, de 26 de octubre de 2007).**

Legislación autonómica (Comunidad Valenciana):

- Ley 2/1992, de 26 de marzo, del Gobierno Valenciano, de saneamiento de las aguas residuales de la Comunidad Valenciana. (DOCV núm. 1761 de 08.04.1992) - Legislación consolidada
- Decreto 170/1992 de 16 de octubre, del Gobierno Valenciano, por el que aprueba el Estatuto de la Entidad Pública de Saneamiento de Aguas Residuales de la Comunidad Valenciana. (DOCV núm. 1889 de 26.10.1992)
- Decreto 9/1993, de 25 de enero, del Gobierno Valenciano, por el que aprueba el Reglamento sobre Financiación de la Explotación de las Instalaciones de Saneamiento y Depuración. (DOCV núm. 1955 de 02.02.1993)
- Orden de 1 de abril de 1993 del Conseller de Obras Públiques, Urbanisme i Transports, por la que se establecen las relaciones entre la Conselleria y la

Entidad Pública de Saneamiento de Aguas Residuales de la Comunidad Valenciana, para la realización de sistemas públicos de saneamiento y depuración. (DOCV núm. 2.001 de 08.04.1993)

- Orden de 9 de noviembre de 1999, del conseller de Obras Públicas, Urbanismo y Transportes, por la que se establecen las relaciones entre la Conselleria y la Entidad Pública de Saneamiento de Aguas Residuales de la Comunidad Valenciana, para la realización de obras de infraestructuras de abastecimiento de agua. (DOCV núm. 3.633 de 25.11.1999).

1.5. Objetivos:

Por todo lo descrito anteriormente, se plantean los siguientes objetivos para este trabajo:

1. Analizar el funcionamiento y el estado del emisario de Gandía en condiciones naturales in situ por medio de buceo con escafandra autónoma.
2. Obtener datos útiles para el modelo de simulación, usando como fuentes de información la propia inmersión, la bibliografía de referencia, así como las entidades responsables (Ayuntamiento de Gandía, EDAR Gandía-La Safor, EPSAR, etc.).
3. Trasladar los datos obtenidos a una maqueta a escala de laboratorio bajo unas condiciones controladas. Escalar todas las variables que influyen en el proceso de vertido y mezcla del mismo adaptándolas al tamaño del modelo.
4. Establecer un marco teórico-práctico para futuros experimentos sobre la difusión en un emisario submarino en cuanto al tratamiento de las variables relacionadas y los materiales empleados para su recreación.
5. Recrear la pluma que genera la abertura principal del emisario en ausencia de perturbaciones, en presencia de viento y estratificación.
6. Recrear la pluma original basándose en el diseño actual del emisario en ausencia de perturbaciones, en presencia de viento y estratificación.
7. Analizar la funcionalidad del emisario para proponer cambios estructurales del mismo o cambios en las variables que rigen la difusión del efluente.

2. ZONA DE ESTUDIO:

En esta sección se recogen las principales infraestructuras en cargadas de la conducción del agua desde que se recolecta hasta que es inyectada en el mar.

2.1. Red de saneamiento de Gandía-La Safor:

La red de saneamiento Gandía-La Safor está formada por cuatro tipos diferentes de estructuras; a) emisarios generales unitarios y sus estructuras de derivación, b) interceptores pluviales, c) estructuras de almacenamiento temporal de aguas pluviales y d) estructuras de tratamiento de aguas residuales (Consejería de Obras Públicas, Urbanismo y Transporte, 2009).

Los emisarios generales unitarios y sus derivaciones sirven para transportar el agua residual desde su fuente hasta la planta depuradora. Para dar servicio a gran parte de la comarca de La Safor existen en total ocho tuberías o sistema de tuberías que dan servicio a las poblaciones de Almoines, Bellreguard, Beniarjó, Beniflá, Benirredrà, Daimús, Gandía, Guardamar de la Safor, La Font d'En Carròs, L'Alquería de la Comtessa, Miramar, Palmera, Piles, Potries, Rafelcofer, Real de Gandía y Villalonga (Epsar, 2019).

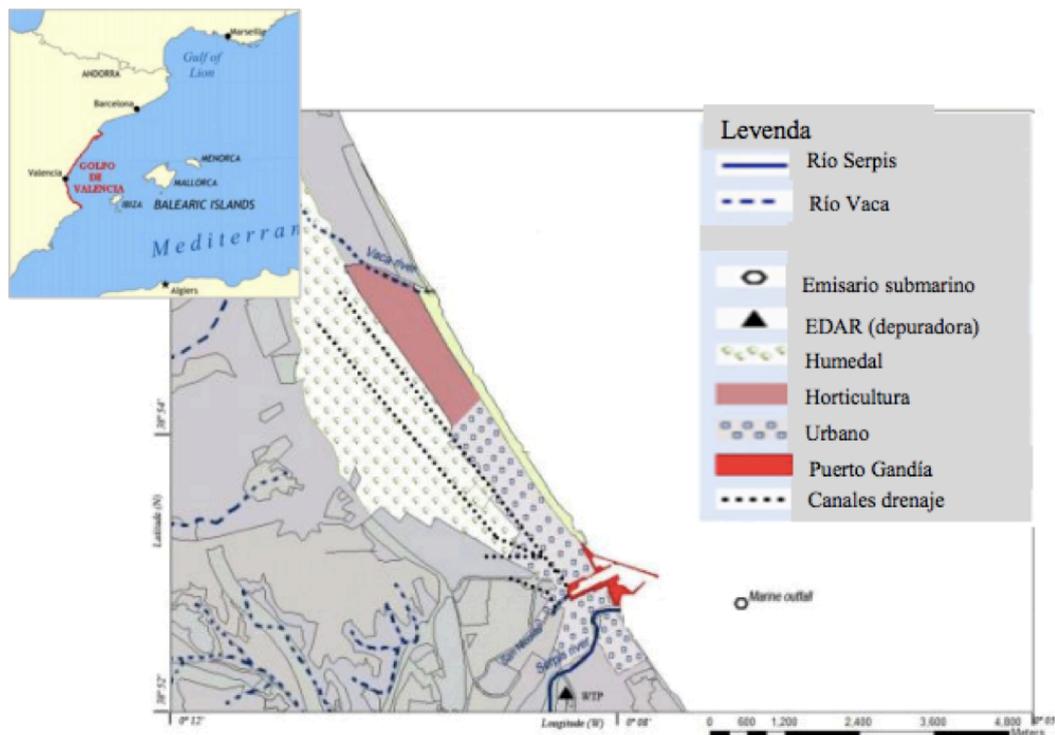


Figura 3. Mapa donde se sitúan los principales cauces y usos del suelo del Grau de Gandía. Incluye la posición del emisario submarino (Gadea Pérez, 2019).

Los interceptores pluviales sirven básicamente como colectores para el drenaje regulando avenidas y reduciendo su peligrosidad (figura 3); las estructuras de almacenamiento temporal de aguas pluviales o mixtas además de para este propósito reducen la cantidad de agua pluvial en el alcantarillado. Esta reducción del caudal hace que el flujo sea laminar homogeneizando el contaminante.

Las estructuras de tratamiento de aguas residuales consisten en una EDAR (figuras 3 y 4) cuyo objetivo es obtener efluentes “limpios” con una concentración de los diferentes indicadores (como DBO o concentración de organismos patógenos) menor que la indicada por la ley. La EDAR de Gandía-La Safor está situada en la Carretera Grao-Oliva próxima al río Serpis (en donde tiene un aliviadero), la cual da servicio a los municipios mencionados anteriormente.

Las emisiones que produce tanto a la atmósfera como al mar, así como los residuos generados se pueden consultar en el Registro Estatal de Emisiones y Fuentes Contaminantes (Prtr-es.es, 2019). Su caudal de proyecto es de 60.000 m³/día pero suele actuar a caudales menores. Sus estadísticas básicas de funcionamiento de 2017 son 36.427 m³/día de caudal 118.102 habitantes equivalentes de población servida y rendimientos (%) de 95, 96 y 90 para SS, DBO5 y DQO respectivamente, según datos de la Entitat de Sanejament d’Aigües de la Generalitat Valenciana (Epsar, 2019).

2.2. EDAR de Gandía-La Safor:

La línea de agua consta principalmente de pretratamiento, tratamiento primario y tratamiento secundario. El tratamiento terciario es más bien una desinfección con cloro que solo se emplea durante eventos desfavorables que hagan que la capacidad de la planta depuradora sea superada o que pongan en peligro la integridad de la instalación.

En general se puede decir que el funcionamiento de la depuradora tiene dos regímenes que tienen que ver principalmente con la ocupación turística de la comarca, la cual tiene un carácter estacional. Así, en los periodos invernales (temporada baja) la población que soporta la instalación es mucho menor que en época estival (temporada alta) donde sufre mayor presión. Esto se debe a un problema del dimensionado de la EDAR. Con el régimen normal, para toda la población de la comarca, se vierte todo el caudal por el emisario, aunque esto puede no suceder debido a fuertes lluvias u otros imprevistos que pongan en peligro la integridad de la planta. En estos casos, se vierte el agua

directamente al río Serpis. Por otra parte, en el régimen de temporada alta es el propio aumento de población lo que produce el desborde de la depuradora. Para evitarlo se desdobra la entrada de agua, y mientras que una parte sigue la línea de tratamiento estándar, otra solo recibe tratamiento físico-químico (decantación y cloración) y se vierte al río Serpis (figura 4).

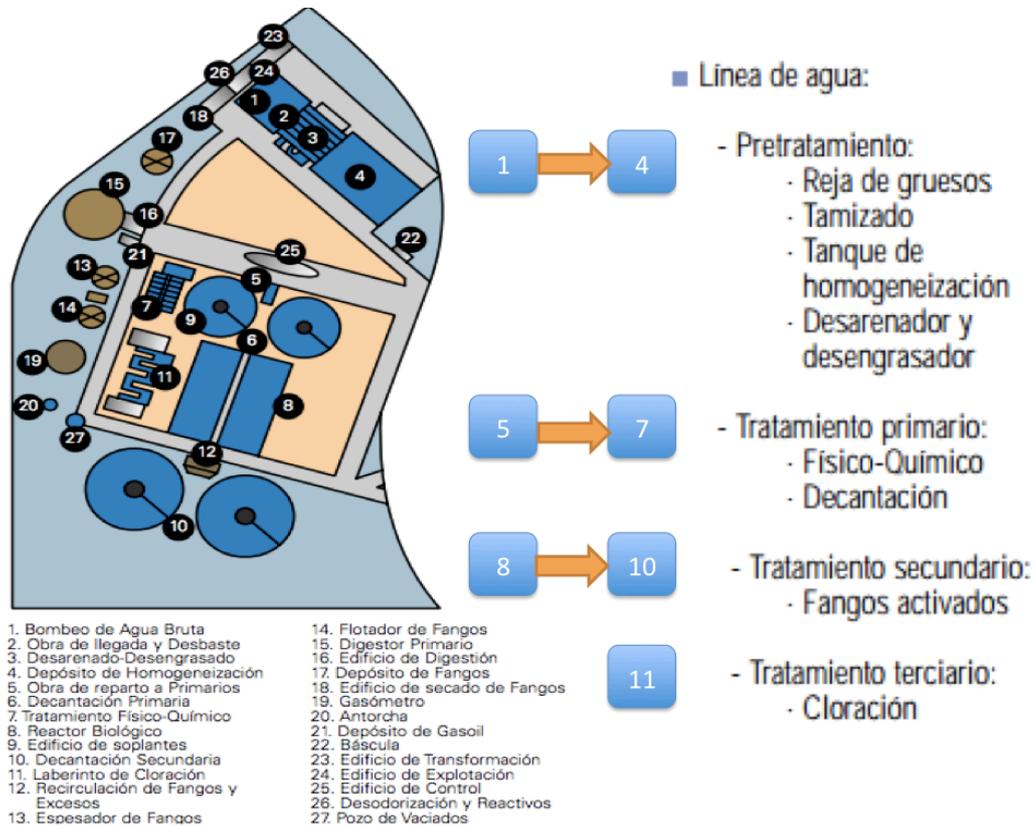


Figura 4. Vista en planta de la EDAR de Gandía-La Safor modificada de (Agroambient.gva.es, 2019). Los números del 1 al 10 corresponden al régimen normal de funcionamiento de la planta. El desdoble de temporada alta corresponde a los números del 1 al 4 más el 11.

En cuanto a la línea principal del tratamiento cabe decir que el caudal de salida se estabiliza en el tanque de decantación (que ocupa la mayor parte de la planta) por lo que los flujos a partir de ese punto son constantes y por tanto el emisario debe expulsar agua de forma continua y uniforme.

2.3. Emisario submarino de Gandía. Obtención de datos:

Para acceder al emisario se sale desde el puerto de Gandía en una lancha neumática semirrígida donde se estiban los materiales para bucear y se miden bajo el agua los

parámetros que afectan al carácter turbulento o laminar de la pluma. El punto exacto de su ubicación se puede tener previamente guardado en la memoria de un GPS, aunque es sencillo de encontrar siguiendo la batimetría con la sonda, ya que la pluma eleva una zona de la superficie del mar por diferencia de densidad, la cual se distingue del resto del agua con facilidad.

La inmersión en el emisario tiene dos funciones: tomar medidas necesarias para realizar el experimento y evaluar visualmente el estado del emisario. En general se debe de prestar atención a los principales problemas que suelen aparecer (Grace, 2007). Para la evaluación visual no se requiere más material que una tablilla y un lápiz; se debe de hacer atendiendo al grado de turbulencia de la pluma, al estado de la estructura (si existen o no fugas, puntos débiles, desplazamiento, etc.) así como el grado de colonización por especies sésiles y si esto interfiere en el rendimiento de la emisión. Se puede comprobar si el sedimento cambia al alejarse del efluente, aunque debido a las condiciones de la fecha del estudio (4 de noviembre de 2018 a las 10:05 horas) es posible que todo el sedimento haya sido re-suspendido.

La medición del emisario es más compleja si se quiere hacer en una sola inmersión debido al tiempo limitado del aire y el tiempo de no descompresión. Para ello se trabajó en parejas, una de las cuales tomó magnitudes merísticas, mientras que la otra contabilizó el número de difusores laterales, su diámetro y también que el diámetro del tubo es constante respecto a su propia longitud (tabla 2). Para ello se emplearon cintas métricas adaptadas con lastre.

2.3.1. Informe de la primera inmersión:

La inmersión se inició en la apertura principal de la tubería en dos parejas, una de las cuales se quedó tomando medidas de la boca y los primeros difusores laterales, mientras la otra se dirigió aguas arriba del emisario anotando los tamaños y las distancias entre los difusores laterales. Las condiciones del agua eran de visibilidad reducida y muy cambiante debido a los cambios de densidad que se producen cerca de cada difusor.

El flujo es turbulento en los 8 primeros difusores laterales como para dejar de distinguir el efluente del agua de mar. Se puede seguir considerando turbulento hasta el difusor número 13, cuyo efluente ya no forma volutas al ser expulsado. Estos difusores no son más que agujeros redondos en los laterales de la tubería (a mitad de altura de esta). En

general, se puede distinguir en estos difusores la mezcla del efluente por el gusaneo característico que producen dos aguas de diferentes densidades al mezclarse (figura 6). Este comportamiento va cambiando progresivamente hasta los últimos difusores laterales y la bocana donde el agua residual parece fluir únicamente por flotabilidad (diferencia de densidad) llegando a penetrar cierta cantidad de agua salada por la parte inferior de la bocana (20 de los 80 centímetros).

Tabla 2. Medidas obtenidas en la primera visita al emisario por medio de buceo autónomo necesarias para la construcción de la maqueta.

Medidas del Emisario	
Perímetro del tubo final	260 cm
Perímetro del tubo inicial	255 cm
Diámetro del tubo	80 cm
Distancia de final al difusor contiguo	15 m
Distancia entre difusores	6 m
Número de difusores	19-20* alternos en los laterales
Longitud del tramo difusor	123 m
Diámetro de los difusores	15 cm
Profundidad	17 m
Distancia del tubo al fondo	80 cm (constante)

Además de observar el rendimiento del emisario se observó su estado de conservación. En cuanto a su integridad, el tubo no parece tener fugas ni zonas débiles por corrosión o desgaste, aunque dados los datos de la muestra que se tomó es probable que existan fugas en tramos superiores (tabla 3).

Todos los tramos tienen las abrazaderas sujetando el tramo difusor a los bloques de hormigón excepto uno donde el emisario sufre un pequeño desvío hacia la superficie, y aunque sigue en su sitio, está desplazado y con la abrazadera rota. Esto fue provocado probablemente por una red de arrastre. Sobre el *fouling*, el tramo difusor está cubierto, sobre todo en los bloques, por restos de artes de pesca tanto profesionales (redes, palangres, etc.) como deportivas (nylon, anzuelos y señuelos artificiales). También lo que parecen ser fondeos que ya forman parte de la estructura. El problema de estos desechos, además de que algunos constituyen contaminación en sí mismos, es que dan soporte a nuevos organismos sésiles lo que aumenta las probabilidades de obstrucción de los difusores laterales (figura 5).



Figura 5. *Fotogramas obtenidos a partir del video grabado en la primera inmersión: En las imágenes superiores aparecen restos de aparejos y fondeos (fouling antropogénico) que puede representar un peligro para la estructura y proveen una superficie para que los organismos la colonicen. En la imagen inferior aparece uno de los pilares del tramo difusor socavado por un congrio (Conger conger) para aprovecharlo como refugio.*

Se observa también que el propio rendimiento del emisario habría podido provocar el cierre completo del último difusor lateral y la obstrucción parcial de los siguientes difusores más cercanos al final del tubo.

La comunidad que habita el emisario es poco variada y está formada principalmente por organismos sésiles filtradores que se adhieren al tubo y a los bloques de hormigón y aprovechan la elevada concentración de materia orgánica y la alta temperatura del agua emitida para medrar. Éste está totalmente recubierto por organismos sésiles en su exterior en especial en las zonas próximas a las salidas de efluente. En el tramo donde las velocidades de salida son pequeñas estos organismos son de mayor tamaño y más “blandos” como briozoos, esponjas, corales y espirógrafos. En el tramo más cercano a la costa donde las velocidades son mayores estos organismos sésiles son

más duros y de menor tamaño para resistir la corriente, principalmente especies incrustantes (figura 6).

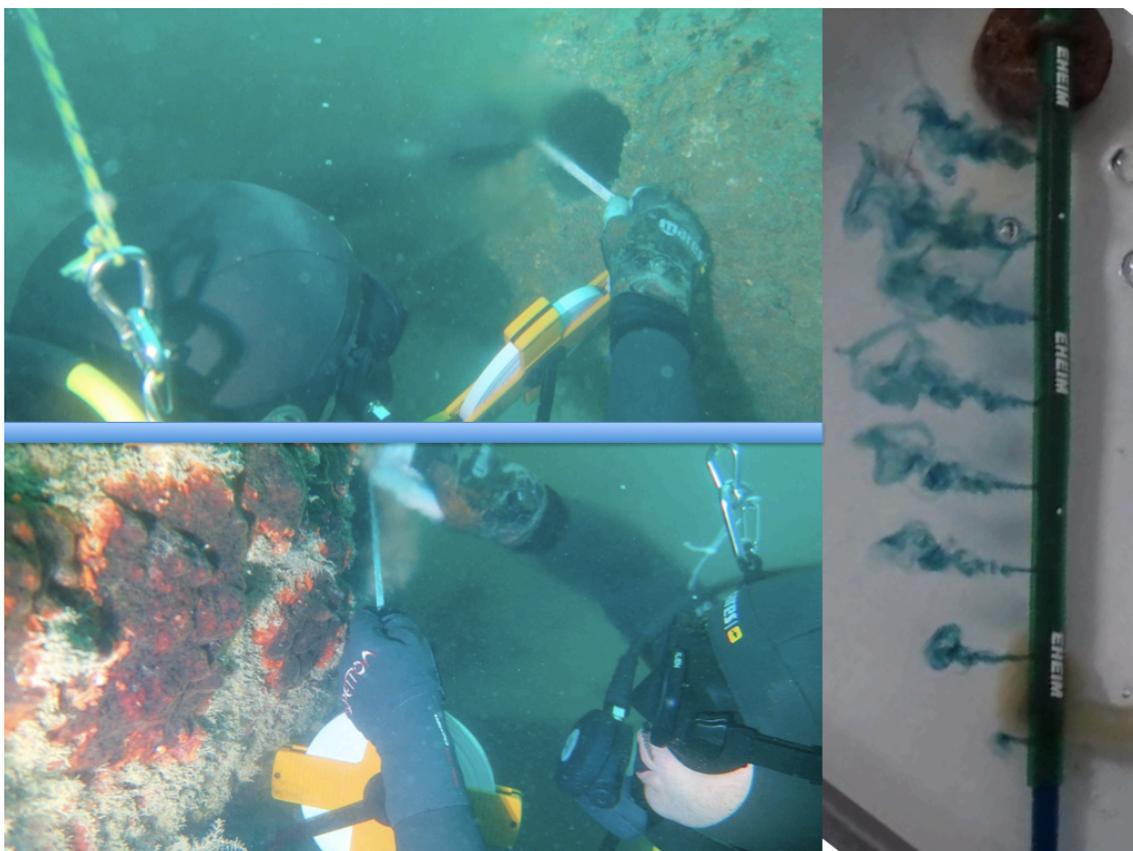


Figura 6. En estos fotogramas se aprecia la diferencia en la velocidad entre los difusores iniciales y finales. Cuando el flujo es turbulento (imagen superior) se intenta medir el diámetro de un difusor lateral donde por el cambio de densidad debido a la alta turbulencia impide ver la mano izquierda; además los organismos incrustantes son de pequeño tamaño. Cuando el flujo ha perdido carga en los difusores finales (imagen inferior) ya no es turbulento, por eso se puede observar el guante enfocado, así como los organismos colonizadores de mayor tamaño. En la imagen derecha se ve este efecto donde la velocidad va disminuyendo. Este efecto fue creado en el laboratorio sin tener en cuenta los parámetros de las aguas emitida y receptora sólo para ilustrar esta imagen.

La comunidad de peces se sustenta sobre estos filtradores y también es poco variada, formada por ramoneadores como lisas o pequeños espáridos, aunque también se observaron oportunistas y/o carroñeros como congrios o pastinacas. En cuanto al primer grupo de peces, muchos de ellos además de abundar en desagües también lo hacen en granjas costeras de acuicultura y están ampliamente reconocidos como vectores de patógenos que afectan a especies cultivadas (Arechavala-Lopez et al., 2013). En cuanto a la segunda especie lo normal sería solo comentar su presencia, sin embargo, el congrio, para hacer su guarida socava la arena en la cual se sostiene uno de los bloques de hormigón, peligrando su estabilidad (figura 5).

Además, se tomó una muestra de agua residual dentro del tubo en el primer difusor lateral (tabla 3), para tener la seguridad de que no hay agua de mar en su interior, suponiendo que no existen fugas en partes superiores del emisario. Esta muestra permite obtener una densidad de referencia del agua emitida, que será la empleada en las simulaciones del modelo a escala.

Tabla 3. *Características de la muestra de agua tomada del interior del emisario en la primera inmersión. Estas medidas fueron obtenidas a partir de un oxímetro portátil.*

Muestra de agua del interior del emisario	
Salinidad	6.1 / 6,07 (volumetría)
Densidad a 20 °C	1002.87
Conductividad	9.63 mS/cm
Concentración de oxígeno	3,91 mg/L
% de Saturación de oxígeno	54,93

Por tanto, se consiguen caracterizar las magnitudes más importantes del tramo difusor para el experimento exceptuando la velocidad, la cual se intenta estimar en una segunda salida al emisario.

2.3.2. Informe de la segunda inmersión:

La siguiente visita al emisario se realizó el día 30 de abril de 2019 a las 10:00 horas para estimar la velocidad entre el último difusor lateral y la bocana principal. Esto permite simular la pluma más relevante usando la velocidad real en ese punto, ya que los datos de la administración no se pueden tener en cuenta debido a las pérdidas de caudal que se producen en las fugas y en los difusores laterales. Para este propósito se decidió emplear proyectiles con una flotabilidad adecuada y trazar el agua con colorante (leche). El descenso se inició sobre la pluma, visible desde la superficie, hacia la bocana principal donde una pareja de buzos se instaló con una cámara de video y uno de los extremos de una cinta métrica (empleada para medir la distancia y como testigo para comunicar a las dos parejas. La otra se dirigió hacia el difusor lateral más cercano con el otro extremo de la cinta y los proyectiles.

Los proyectiles y el trazador se introdujeron por este difusor midiendo el tiempo que tardaron en salir del tubo. La distancia entre ambos puntos se midió con una cinta métrica, que también sirvió para comunicar ambas parejas de buzos. Lamentablemente

los proyectiles no se comportaron de la forma esperada, tardando tiempos irregulares en ser expulsados e incluso quedando retenidos dentro del tubo. Esto es debido a la intrusión salina la cual hace viable el desarrollo de especies sésiles (biofouling) que podrían actuar como obstáculos. La penetración de agua salada también permite la entrada de peces, en especial mugílidos, que pueden interactuar con los proyectiles. A todo esto, se suma posibles acumulaciones de sedimento dentro del emisario que pudieran obstruirlo parcialmente. Tanto la obstrucción salina como la acumulación de sedimentos son problemas importantes para un funcionamiento correcto y son peligros para la integridad de la estructura, siendo ambas debidas a una velocidad insuficiente. Esto demuestra que la variable más importante del diseño es la velocidad del efluente.

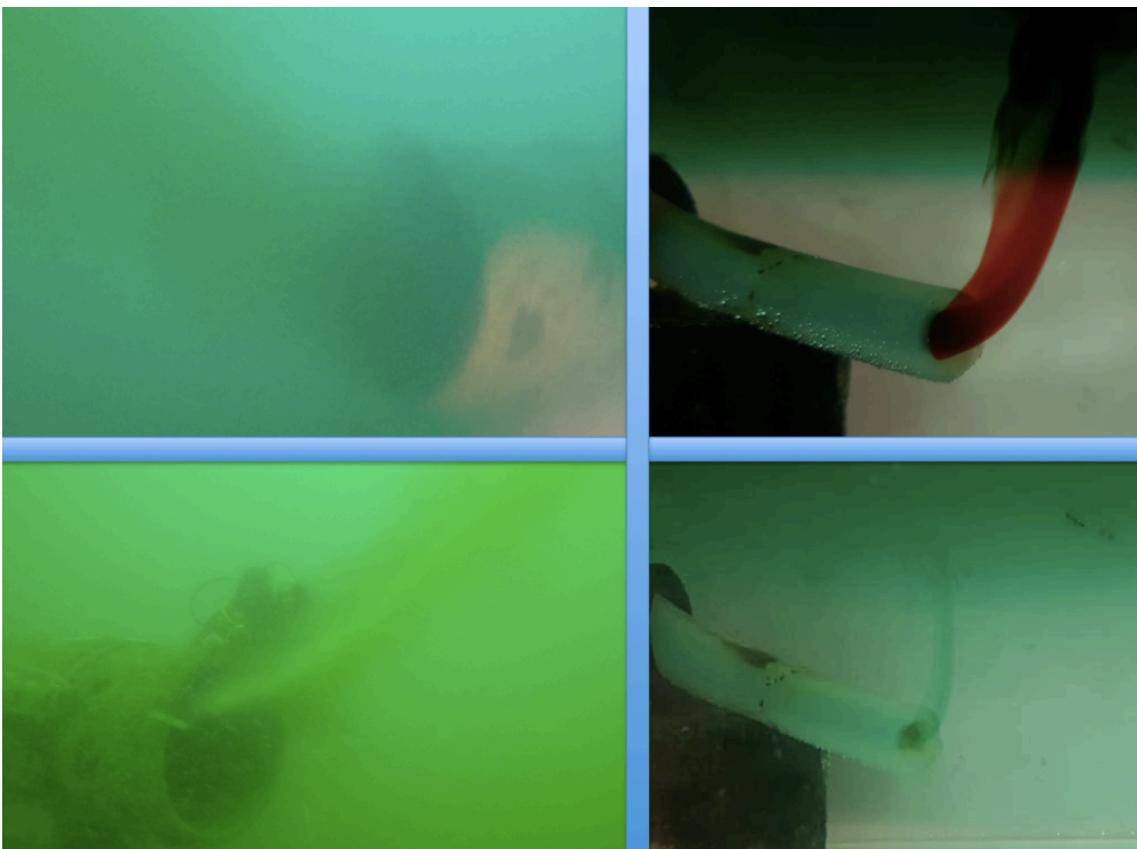


Figura 7. En estos fotogramas obtenidos a partir de los videos de las inmersiones en el emisario y del laboratorio se compara entre el emisario real y el modelo a escala vertiendo de forma proporcional (números de Froude similares). En las dos imágenes superiores se emplean los datos de la administración y la primera visita al emisario. En las inferiores los datos obtenidos de la segunda salida. Además, abajo a la izquierda se puede ver salir la leche por la parte superior de tubo, el contaminante por la zona central y la zona inferior absorber agua de mar lo que indica que en el interior del tubo el flujo es laminar hasta cortarse con la cuña salina.

Por otra parte, trazar el agua con leche evita todos los problemas anteriores y su visualización, en las condiciones de visibilidad del emisario, es mucho mas sencilla. Por

estas razones, teñir el agua demuestra ser la mejor estrategia para trazar la velocidad en este caso. Este método permite una buena estimación de la velocidad y número de Froude para trasladar al modelo a escala sin embargo puede no representar el caudal si el vertido no se produce a través del total del área de la abertura principal. Cabe comentar que el líquido que se emplee para trazar, si el régimen de flujo dentro del tubo es laminar, ocupará la capa que le corresponda por su densidad. En esta inmersión el caudal era extremadamente bajo y por la abertura principal solo salía agua residual por los 40 centímetros superiores. El resto del diámetro introducía agua salada por la parte inferior. Ésta diferencia se puede deber tanto a un problema técnico como a la ausencia de estos: cada vez que se limpia el emisario se aumentan las pérdidas de carga, es decir, cuanto menos obturados estén los orificios peor funcionará el tramo final (figura 7).

3. FUNDAMENTO TEÓRICO:

Para que un líquido se diluya en otro deben de tener características similares. En este caso el factor que diferencia el agua receptora del efluente en mayor magnitud es la diferencia de densidades ($\Delta\rho = \rho_0 - \rho_1$) debida a la salinidad.

Cuando varios cuerpos de agua tienen densidades diferentes y ocupan un mismo volumen tienden a estratificarse buscando su posición más estable, esto es, formando un gradiente negativo de densidades. En este caso la diferencia de densidades hace que el agua residual, con menor contenido salino y mayor temperatura, forme una pluma ascendente hacia la superficie del mar ($z=0$). La tendencia del cuerpo de agua emitido, si este no se mezcla lo suficiente, es ocupar la capa superficial del mar, transformando su velocidad vertical en horizontal al aproximarse a $z=0$. Como este escenario es obviamente negativo y puede tener consecuencias en todos los ámbitos, se deben de valorar los mecanismos que producen una buena mezcla de las dos aguas así como las variables que los gobiernan.

Por tanto, en este apartado se presentan dos grupos diferentes de leyes, fenómenos y variables: las que rigen el experimento y las que se producen en el experimento. Las primeras permiten diseñar el modelo a escala, es decir, sirven para hacer que el modelo funcione. Las segundas explican los fenómenos que se producen en el modelo. Hay un fenómeno que se incluye en ambas, ya que rige y se usa para escalar todo el modelo,

siendo en general el principal proceso de mezcla en el campo cercano cuando se diseña una estructura de este tipo: la turbulencia

3.1. Turbulencia:

Al igual que en la antigüedad se podía predecir la trayectoria de los cuerpos celestes, pero no se conocía el por qué, en la actualidad sucede lo mismo con la turbulencia, se puede predecir y existen herramientas para su estudio, sin embargo, es una materia en la que aún existen muchas incógnitas. La ciencia ha sido valorada precisamente por ese poder de predicción que si que se ha logrado con la mecánica celeste, sin embargo en el caso de la dinámica de fluidos no se ha alcanzado tal nivel de precisión; sobre todo en los procesos que se relacionan con altas velocidades y viscosidades (comportamiento no lineal). Esto está relacionado con el hecho de que un fluido, aún estando en reposo, está compuesto de partículas en movimiento que colisionan entre sí. Al alterar estas partículas su comportamiento pasa de ser laminar o lineal a inestable o turbulento. Este caos en la estructura de la materia hace que una pequeña perturbación se pueda ver amplificada y por ello este fenómeno resulta difícil de estudiar (Mora, 2017).

Las ecuaciones de Navier-Stokes describen el movimiento de un fluido tanto si está en régimen laminar como turbulento, y por eso son empleadas en la predicción meteorológica sin embargo no tienen soluciones analíticas y a diferencia de las ecuaciones diferenciales de los cuerpos celestes, no se puede demostrar de forma matemática la existencia de dichas soluciones (Mora, 2008). Esta ecuación [1] proviene considerar todas las posibles fuerzas, masas y aceleraciones presentes en un fluido de acuerdo a la Segunda Ley o Principio Fundamental de la Dinámica de Newton,

$$\rho \left(\frac{\partial V}{\partial t} + V \cdot \nabla V \right) = \nabla P + \rho g + \nu \nabla^2 V \quad [1]$$

donde a la izquierda de la ecuación está el producto de la masa (ρV) por la aceleración y a la derecha están las fuerzas debidas al gradiente de presión horizontal, a la gravedad y al rozamiento o viscosidad.

Uno de los pioneros en el estudio de la turbulencia, Osborne Reynolds (figura 8), usó un tanque para experimentar basándose en una sola de las componentes dimensionales de la ecuación Navier-Stokes (Maurits, 2015). Para ello, además empleó una

simplificación añadiendo un parámetro adimensional que incluye el diámetro de un tubo dado, la velocidad del fluido que circula por éste y la viscosidad de dicho fluido:

$$\frac{\partial u_i}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_j} (u_i u_j) = -\frac{\partial P}{\partial x_i} + \frac{1}{Re} \frac{\partial^2 u_i}{\partial x_j \partial x_j} \quad [2]$$

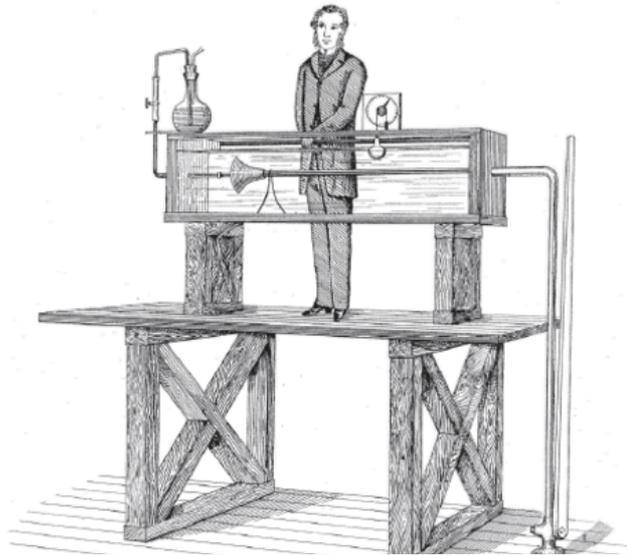


Figura 8. Representación esquemática del experimento con el que Reynolds confirmó su hipótesis (Maurits, 2015).

El nº de Reynolds (Re), es un número adimensional empleado en física de fluidos que relaciona las fuerzas inerciales con las fuerzas viscosas y su valor indica si un flujo se considera laminar o turbulento:

$$Re = \frac{U_0 d_0}{\nu_0} \quad [3a]$$

donde U_0 es la velocidad del agua dentro de un tubo de sección circular, d_0 el diámetro del tubo y ν_0 es la viscosidad cinética del fluido que circula en su interior, que es igual al cociente entre la viscosidad dinámica de dicho fluido y su densidad ($\nu_0 = \mu_0 / \rho_0$):

$$Re = \frac{U_0 d_0 \rho_0}{\mu_0} \quad [3b]$$

Se considera que para valores mayores de 4000 el fluido tiene un carácter turbulento y por debajo de 2000, laminar. Este es un parámetro que sirve sólo para el agua del tubo y no se relaciona en absoluto con el agua receptora, pero su valor está relacionado con la velocidad y el diámetro del emisario, que son las principales variables susceptibles

de modificación. Por ello se requiere de otro parámetro que pueda describir el carácter turbulento de un fluido en un cambio de fase. El nº de Froude (Fr), es un número adimensional que relaciona las fuerzas inerciales con las fuerzas gravitacionales y su valor indica si el régimen de un flujo es crítico, subcrítico o supercrítico si su valor es mayor, menor o igual a 1 respectivamente. Inicialmente el nº de Froude fue pensado para canales abiertos de sección rectangular y distinguía un comportamiento “fluvial” de otro “torrencial”. De forma gráfica, este número marca la diferencia entre derramar e inyectar. Tiene diferentes expresiones dependiendo de su aplicación y esta es la que corresponde a canales circulares cerrados:

$$Fr = \frac{U_0}{\sqrt{g_0 d_0}} \quad [4]$$

donde U_0 es la velocidad de salida del agua del emisario, d_0 el diámetro de la bocana y g_0 es la gravedad relativa que se define como $g_0 = g\Delta\rho/\rho_0$ siendo $\Delta\rho$ la diferencia entre la densidad del medio receptor, ρ_1 y la densidad del efluente, ρ_0 :

$$Fr = \frac{U_0}{\sqrt{g\Delta\rho d_0/\rho_0}} \quad [5]$$

Dado que esta gravedad relativa depende del medio receptor y de las características de la emisión, así como el resto de variables, comunes al número de Reynolds que caracterizan la emisión, todo esto hace que el número de Froude sea el mejor parámetro empleado para regir y escalar el experimento. De hecho, si se procede escalando las velocidades no se consigue reproducir la realidad. El procedimiento debe ser recalcular la velocidad experimental a partir del número Fr del emisario real para las densidades y diámetro de la maqueta [5] o emplear también el número Re real [7], tal como se explica en la ecuaciones propuestas por Sharp y sus colaboradores.

Tabla 4. Caudales, velocidades y números de Froude para los diferentes datos disponibles. Nótese que los dos primeros están referidos a un punto anterior al tramo difusor, por lo que a medida que el flujo sobrepasa los difusores laterales estos valores se van haciendo menores. El tercer conjunto de datos es una estimación realizada entre el último difusor lateral y la abertura final y se asume que la velocidad inicial es similar a la velocidad media.

Régimen de Flujo	Caudal (m3/s)	Velocidad (m/s)	Nº de Froude
Máximo (admin.)	0,694	1,382	3,619
Medio (admin.)	0,422	0,839	2,197
Final (estimado)	0,116	0,230	0,603

En aras de hallar la medida del diámetro del tramo difusor en base a una velocidad dada se puede sustituir la fórmula del número de Froude dentro de la ecuación del número de Reynolds,

$$d_0 = \left(\frac{Rev_0}{Fr g_0^2} \right)^{\frac{2}{3}} \quad [6]$$

y sustituyendo esta ecuación en la fórmula del número de Froude se puede obtener la velocidad para la descarga deseada (Sharp, Shawcross and Greated, 2014):

$$U_0 = (Rev_0)^{\frac{1}{3}} \left(Fr g_0^2 \right)^{\frac{2}{3}} \quad [7]$$

3.2. Teorema de Bernouilli:

Aunque no guarda una relación tan directa con los fenómenos que se pretenden o esperan observar en el tanque, es necesaria una explicación sobre la velocidad en el interior del tramo difusor y sobre la velocidad que se va a emplear en las simulaciones del laboratorio. Teorema de Bernouilli es una aplicación del principio de conservación de la energía a conductos cerrados, y sirve para determinar las velocidades del experimento de forma correcta teniendo en cuenta las diferencias de altura.

$$E_c = \frac{1}{2} mv^2 ; \quad [8a]$$

$$E_p = mgh ; \quad [8b]$$

$$E_f = P \frac{m}{\rho} ; \quad [8c]$$

$$\Delta \Sigma E = 0; \quad [8d]$$

$$\frac{1}{2} mv_i^2 + gh_i + \frac{P_i}{\rho} = \frac{1}{2} mv_f^2 + gh_f + \frac{P_f}{\rho} ; \quad [9]$$

$$\frac{1}{2} \Delta v^2 + g \Delta h + \frac{1}{\rho} \Delta P = 0 \quad [10]$$

Asumiendo que la presión dentro del tubo es la misma excepto por la diferencia de alturas al principio y al final, $\Delta P = \rho g \Delta h$; y asumiendo que el fluido no se comprime ($\rho = \text{cte}$) y sustituyendo se obtiene,

$$\frac{1}{2}\Delta v^2 + 2g\Delta h = 0 \quad [11]$$

que permite calcular la velocidad final del agua antes de cualquier pérdida de caudal y por tanto presión resultando la conocida expresión de Torricelli:

$$v_f = \sqrt{2g\Delta h + v_i^2} \quad [12]$$

Sin embargo, si esta agua es conducida hacia otro depósito con la misma altura de agua el habría que introducir dentro de la raíz el término “ $-2g\Delta h$ ” con un valor idéntico y solo habría desplazamiento de agua si los depósitos se encuentran a diferentes alturas entre sus superficies. Dicho de otra forma, si dos recipientes están conectados con idéntica altura de agua y ambos están a la misma altura no se producirá intercambio de agua y la velocidad es cero. Por tanto, la velocidad empleada en este experimento es la de un cuerpo en caída libre menos la pérdida de carga (fuerzas dispersivas).

Haciendo un cálculo de forma aproximada tanto a escala (por ejemplo, $g=10 \text{ m/s}^2$, $\Delta h=0.02 \text{ m}$ y $v_i > 0$) como en dimensiones reales ($\Delta h=20 \text{ m}$) se desprende que al aumentar las velocidades iniciales (segundo sumando dentro de la raíz en [12]) acaban teniendo más peso que la energía potencial y la presión. Sin embargo, son velocidades muy por encima de las reales y por tanto se deben de tener en cuenta las diferencias de altura para el experimento en el rango de velocidades que se manejarán.

Conviene hacer un inciso en este punto para comentar que uno de los métodos para impulsar el agua usados en este trabajo es la gravedad (energía potencial). A partir de diferentes alturas entre el depósito y la salida del emisario se pueden conseguir diferentes velocidades. Sin embargo, la complicación reside en que estas velocidades sean constantes.

Empleando el principio de conservación de la masa y el teorema de Bernouilli $C_i = C_f$; $C_t = \sum C_n$ se obtiene la conocida expresión,

$$V_i A_i = V_f A_f \quad [13]$$

donde, asumiendo que no se producen pérdidas, el caudal inicial es igual al caudal final, expresión que se puede escribir en función de la velocidad. El problema se complica cuando existe más de una sección final, en este caso una bocana final y 19 difusores laterales:

$$V_i A_i = V_{d1} A_d + V_{d2} A_d + \dots V_{d19} A_d + V_f A_i; V_i A_i = 19(V_d A_d) + V_f A_i \quad [14]$$

Sin embargo, la expresión anterior es incorrecta dado que la velocidad dentro del tubo varía (disminuye), debido a la pérdida de carga que se produce en los difusores laterales. Lo que sucede es que la velocidad disminuye cada vez el fluido pasa por un difusor lateral, por lo que cada difusor expulsa a una velocidad diferente y entre cada par de difusores existe una velocidad diferente dentro del tubo (figura 9), tal como indican las siguientes ecuaciones consecutivas que permiten calcular las velocidades de cada difusor y la bocana final:

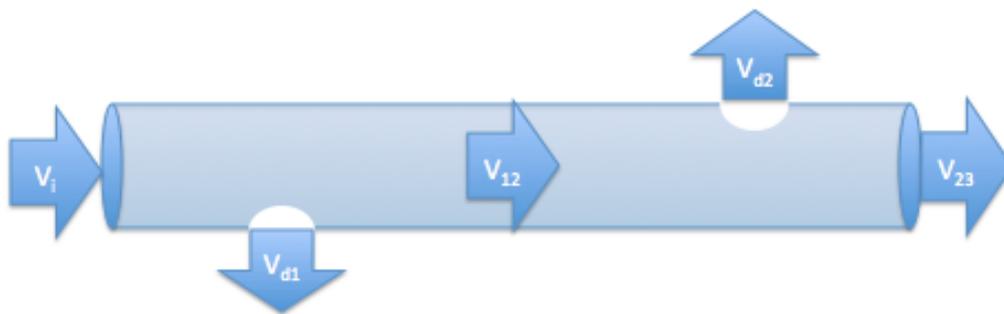


Figura 9. Diagrama esquemático de una sección del tramo difusor donde se representan los dos primeros difusores laterales.

$$V_i A_i = V_{d1} A_d + V_{12} A_i \quad [15. \text{Difusores 1-2}]$$

$$V_{12} A_i = V_{d2} A_d + V_{23} A_i \dots \quad [15. \text{Difusores 2-3}]$$

$$V_{1819} A_i = V_{d19} A_d + V_f A_i \quad [15. \text{Difusores 19-f}]$$

Las áreas del tubo (A_i) y de los difusores (A_d) son constantes a lo largo del tubo tal y como se observó en la inmersión. Sin embargo, se observa que cada ecuación presenta dos incógnitas si solo se tiene la velocidad inicial. Por tanto, se necesita un mayor número de datos o una ley que defina las velocidades a partir de las áreas en una bifurcación. Se puede ver que a partir de estas 19 ecuaciones se necesitarían o bien todos los valores de las velocidades de los difusores laterales o bien todos los valores de la velocidad dentro del tubo de entre cada par de difusores. Aunque sería perfecto disponer o tomar estas medidas, en la práctica resulta un esfuerzo y costes muy elevados. Otra aproximación sería estimar el cálculo a partir de pérdidas de carga, pero tanto los materiales como la arquitectura de cada experimento son diferentes y el nivel

de precisión necesario para visualizar los fenómenos no es tan elevado. Otra aproximación sería estimar el cálculo a partir de pérdidas de carga, pero tanto los materiales como la arquitectura de cada experimento son diferentes y el nivel de precisión necesario para visualizar los fenómenos no es tan elevado. Este problema fue resuelto (Rawn, 1961) calculando las pérdidas de carga desde el difusor más lejano hasta el más cercano de la costa uno a uno, sin embargo, esto requiere un mayor número de datos y un ordenador para obtener las soluciones. Dado que obtener soluciones numéricas exactas resulta extremadamente complejo y al ser un trabajo relacionado más con la oceanografía que con la ingeniería se decide hacer una aproximación en las velocidades de diseño del experimento. Con estas aproximaciones se realizan las simulaciones donde sí se conoce la velocidad real. La opción más simple consiste en tomar como referencia la velocidad final (entre el último difusor y la bocana) y simular un emisario con solo la apertura final del mismo tamaño que el diámetro del tubo. La segunda opción es emplear como referencia la velocidad inicial (obtenida de los datos de la administración para el 2017) y añadir a la maqueta los diecinueve difusores laterales.

3.3. Sobre la estratificación y las ondas internas:

Un volumen de fluido estratificado se puede describir como parcelas con diferentes densidades de forma decreciente debido a la fuerza de la gravedad. Cuando cada capa está en la altura que le corresponde teóricamente se dice que la columna de agua es estable.

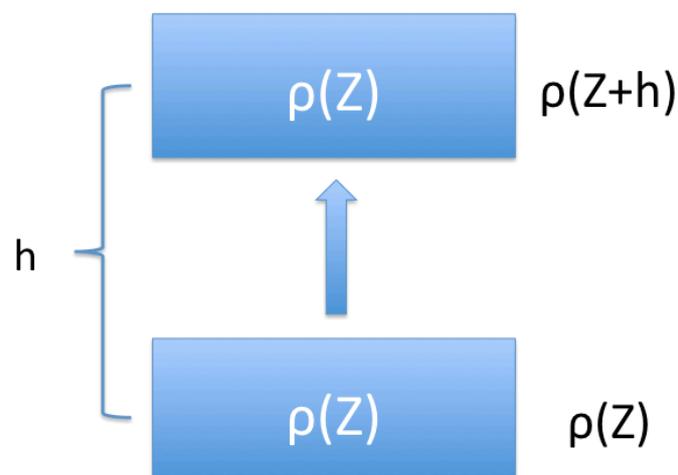


Figura 10. Esquema del desplazamiento vertical de un volumen de agua una distancia h , donde la densidad varía con la profundidad.

Cuando un volumen de agua está en una profundidad (z) que no le corresponde se desplaza (figura 10), pasándose de su profundidad de equilibrio por la inercia hasta que la fuerza boyante hace que vuelve a cambiar su sentido de desplazamiento, creándose (en ausencia de fuerzas de rozamiento) una oscilación armónica.

La frecuencia de esa oscilación se conoce como frecuencia de Brunt–Väisälä y se obtiene a partir de aplicar la Segunda Ley de Newton a la parcela de agua inestable de la siguiente forma. Sea el peso de el volumen (V) de la parcela de agua, $V \cdot g \cdot [\rho(z + h) - \rho(z)]$ por lo que trasponiendo a la conocida fórmula $F = m \cdot a$:

$$V \cdot g \cdot [\rho(z + h) - \rho(z)] = \rho(z) \cdot V \frac{\partial^2 h}{\partial t^2} \quad [16]$$

en donde podemos sustituir en el término de la derecha la densidad dependiente de la profundidad por la densidad de referencia, basando esa aproximación en las pequeñas diferencias de densidad en el océano comparadas con la magnitud de la propia densidad de referencia. Usando la definición de derivada se obtiene:

$$\frac{\partial^2 h}{\partial t^2} - \frac{g}{\rho_0} \frac{\partial \rho}{\partial z} h = 0 \quad [17]$$

Esto es una ecuación diferencial de segundo orden que presenta dos casos dependiendo del signo del coeficiente en **negrita**. Si este es positivo, el gradiente de la densidad con la profundidad es negativo y por esa razón la columna de agua es estable, porque la densidad crece hacia abajo. Se define la frecuencia de flotabilidad, estratificación o Brunt–Väisälä (N) con dimensión (T^{-1}):

$$N^2 = - \frac{g}{\rho_0} \frac{\partial \rho}{\partial z} > 0 \quad [18]$$

La solución de [17] para el caso $N > 0$ es oscilatoria por lo que se puede obtener por el método de suma de cosenos, pero también por cambio de variable y se obtiene:

$$h = h_0 \cos(Nt) \quad [19]$$

En la realidad el movimiento armónico de [19] no es perfecto y debido a las fuerzas de rozamiento ($F_r = -rv$), que en un fluido son importantes, el “rebote” del cuerpo de agua se

atenúa con el tiempo. Añadiendo a [17] las fuerzas de fricción (de la forma $F_f = -r \frac{dh}{dt}$) se obtiene una nueva ecuación diferencial cuya solución presenta dos casos: la flotabilidad es más importante que la fricción [20] o la fricción es más importante que la flotabilidad [21]. Aunque el método para hallar ambas soluciones es relativamente sencillo también es extenso y no aporta información en los pasos por lo que se presentan ambas soluciones:

$$h = h_0 e^{-rt/2} \frac{N}{\sqrt{N^2 - \frac{r^2}{4}}} \cos \left(\sqrt{N^2 - \frac{r^2}{4}} t + \arctan \left(\frac{-r}{2\sqrt{N^2 - \frac{r^2}{4}}} \right) \right) \quad [20]$$

$$h = \frac{h_0}{2\sqrt{\frac{r^2}{4} - N^2}} \left[\left(\frac{-r}{2} + \sqrt{\frac{r^2}{4} - N^2} \right) e^{\left(\frac{-r}{2} - \sqrt{\frac{r^2}{4} - N^2} \right) t} - \left(\frac{-r}{2} - \sqrt{\frac{r^2}{4} - N^2} \right) e^{\left(\frac{-r}{2} + \sqrt{\frac{r^2}{4} - N^2} \right) t} \right] \quad [21]$$

Aunque el comportamiento de estas soluciones no resulte evidente se puede comprobar que mientras una es de carácter oscilatorio, lo que se puede ver por la presencia de la función trigonométrica, la otra es solo de decaimiento, pues solo tiene exponenciales con argumento negativo (figura 11). Ambos cuerpos de agua terminan en equilibrio, mientras que en el primer caso se produce un movimiento armónico en su longitud y amortiguado en su amplitud, en el segundo caso la fricción es tan grande que impide el movimiento armónico y el cuerpo de agua asciende o cae “de forma asintótica” desde h_0 hasta donde se desplazó hasta encontrar el equilibrio ($h=0$).

Existe una relación entre estos fenómenos y las ondas internas puesto que N es el límite superior que estas ondas alcanzan en el océano. Además, las fuerzas que las provocan son las mismas pues también se consideran ondas de gravedad. Constituyen un proceso de mezcla clave en el océano, generando turbulencia, afloramiento y hundimiento, bases para la producción primaria en la capa fótica (Ott, 2005).

Lo peculiar de estas ondas es que la fuerza de restauración (la gravedad) es casi tres ordenes de magnitud menor que en las ondas superficiales ya que la diferencia de densidades entre el agua y el aire tiene salto de factor de 800 comparado con la pycnoclina más intensa que se pueda imaginar en el océano. Este hecho provoca que la fuerza de restitución sea muy débil lo que provoca grandes períodos y longitudes de onda y altas velocidades de fase en comparación con las ondas superficiales. Sin

embargo, su característica más sorprendente es que advectan energía hacia el fondo, lo cual llega a producir erosión en el lecho marino. Esto es debido a que la componente vertical de la velocidad de grupo tiene signo negativo. Para este caso en particular se ha demostrado que en un ambiente estratificado donde existe una pluma convectiva (por ejemplo, un emisario) la frecuencia de las ondas internas está relacionada con la altura que alcanza la pluma sobre su nivel de equilibrio, y, por tanto, depende de la frecuencia de flotabilidad (Ansong and Sutherland, 2010).

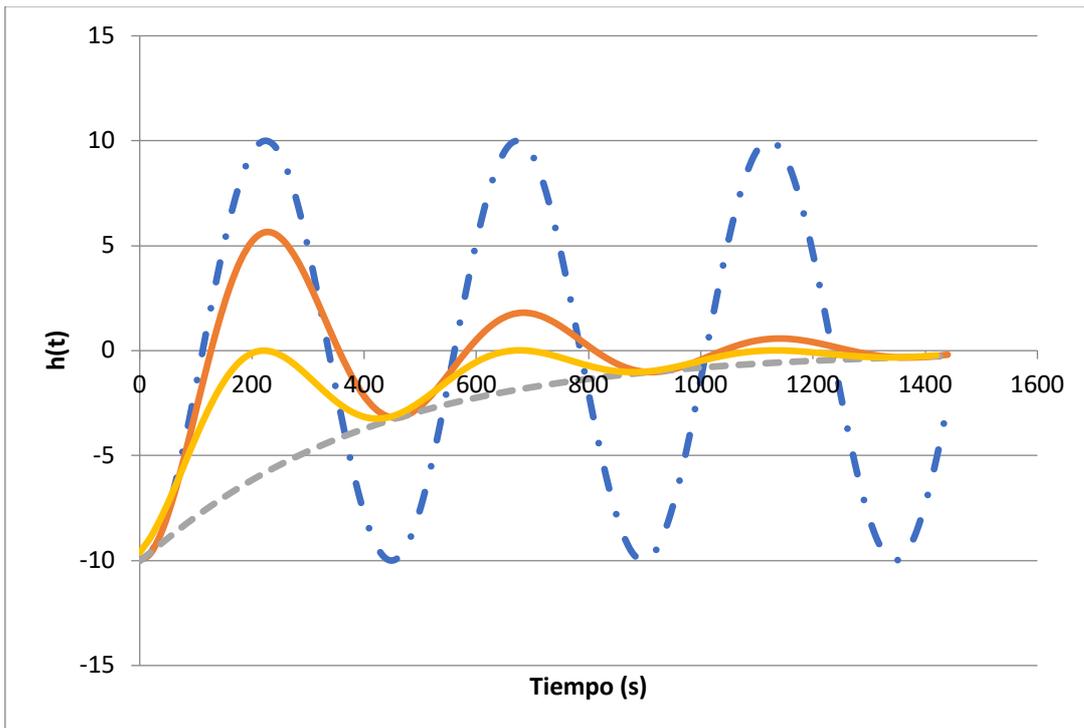


Figura 11. En esta figura se ven los tres tipos de movimiento oscilatorio para $N=1,4 \times 10^{-2} \text{ s}^{-1}$ y $h_0=-10 \text{ (m)}$. La curva azul (movimiento armónico) se corresponde con [18] y los movimientos amortiguado [20] ($r=5 \times 10^{-3}$) subamortiguado [19] ($r=5 \times 10^{-2}$) con la curva verde y la roja respectivamente. Este tipo de curvas se observarán en el tanque experimental. La curva morada es el movimiento teórico que se produciría cuando la interfase superior es el aire, es decir, en plumas sin estratificación.

3.4. Otro proceso de mezcla turbulenta: cizalla vertical.

Durante las simulaciones se observarán varios mecanismos de mezcla además de la turbulencia del chorro y la oscilación que produce. Los procesos naturales como el viento, el oleaje y las corrientes son ampliamente conocidos y merecen la pena ser citados debido a que muchos de los siguientes fenómenos pueden ser ocasionados o incrementados por ellos. Uno de los mecanismos de mezcla provocado por el emisario, pero dependiente de las condiciones, es la cizalla vertical, que se produce entre dos

cuerpos de agua con velocidades diferentes. Para que este fenómeno suceda deben de existir dos fluidos con diferentes propiedades (velocidad, densidad, etc.) lo que genera una fuerza cortante perpendicular. Esto genera inestabilidades en la interfase y se producen pequeños procesos turbulentos de intrusión de vórtices entre ambos fluidos.

En teoría, si la velocidad de la pluma es suficiente, uno de los mecanismos de mezcla que se observarán en el laboratorio serán estas inestabilidades. Si además la pluma se expande formando una capa, las características de las ondas internas que se desarrollen y la velocidad que tiene la propia capa pueden permitir la observación de estos fenómenos. Este proceso ha sido observado de forma más sencilla en la atmósfera (tanto de la Tierra como de otros planetas) que en el océano, sin embargo se produce en zonas estratificadas con grandes diferencias entre las velocidades de sus capas como son estrechos, desembocaduras y estuarios. También, a menor escala, en las plumas formadas por los emisarios (Wilkinson, 1991). La evolución es similar a la formación del oleaje en el mar, donde primero se produce una ondulación en la superficie (interfase) que en su cresta puede tener pequeñas roturas (inestabilidades) y que cuando por su velocidad relativa colapsa forma rompientes y remolinos. Cuando una onda interna desarrolle rompientes se dice que sufre una inestabilidad de Kelvin-Helmholtz. En definitiva, la fuerza de cizallamiento es un fenómeno clave en la mezcla vertical cuando la columna está estratificada.

4. DISEÑO EXPERIMENTAL:

El experimento se realiza en un tanque de cristal con capacidad máxima aproximada de 74 Litros que hará las veces de mar conteniendo el agua receptora. Dadas sus medidas, permite observar muchos de los procesos físicos en una sola de las dimensiones horizontales, que se corresponde con el eje Este-Oeste, coincidiendo con tierra y mar abierto respectivamente (tabla 5).

Tabla 5. Principales medidas del tanque de simulación y volumen y cantidad de sal según la escala. De todas las dimensiones, la única que se puede modificar es la altura o profundidad del emisario. Depende del diámetro de tubo y por tanto de la escala que se escoge.

Dimensiones del Tanque	Escala 1:100	Escala 1:133
Largo (dm)	19,86	19,86
Ancho (dm)	1,86	1,86
Alto (dm)	1,70	1,2
Volumen (L)	62,80	44,33
Salinidad 22 (g)	1381,60	975,23

Para simular el tramo difusor se emplea un tubo de silicona. Cabe recordar que la sección (velocidad) y el diámetro de tubo son variables clave en el experimento dado que lo rigen (son los parámetros del número de Froude que se pueden tener en cuenta en el diseño y la construcción de un emisario, a diferencia de la densidad del medio receptor). Se hacen pruebas con diferentes diámetros y velocidades para escoger el mejor tamaño. La anchura (diámetro) de éstos será de 4, 6, 8 y 10 milímetros, ya que con tamaños más pequeños el fenómeno no se visualiza con claridad y no es posible realizar difusores tan pequeños a escala con el material disponible. Diez milímetros es la mayor escala que permite el tanque, aunque obliga a subrepresentar la profundidad, y el volumen a introducir sería muy limitado. Cuanto mayor sea la escala mejor se podrá visualizar el fenómeno, sin embargo, debido a estos inconvenientes se descartaron los diámetros de 10 y 8 (mm). Resultó ser el más adecuado el de 6 mm, pues permite una buena visualización de los procesos con las velocidades más similares en el tanque, y los tiempos de llenado, vaciado y reposo del mismo son relativamente cortos. De esta forma queda determinada la escala de la reproducción del emisario, siendo esta aproximadamente de 1:133 (tabla 6). Se puede marcar en el tubo una medida para controlar la velocidad en el video.

Tabla 6. Escalas que se han simulado previamente para optimizar la maqueta definitiva. Las maquetas mayores hacen más sencillo escalar las variables y visualizar los fenómenos, mientras que las escalas menores son más complejas de parametrizar y visualizar, pero permiten simular durante mayor tiempo y son más eficientes con el gasto de agua y tiempo.

Escala	"1:1"	"1:100"	"1:133"
Perímetro (m)	2,60000	0,026000	0,019549
Diámetro (m)	0,80000	0,008000	0,006015
Sección (m ²)	0,50265	0,005027	0,000028
Profundidad (m)	17,0000	0,170000	0,127820
Distancia al fondo (m)	0,80000	0,008000	0,006015
Distancia entre difusores (m)	6,00000	0,060000	0,045113
Diámetros difusores (m)	0,15000	0,001500	0,001128
Sección de cada difusor (m ²)	0,01767	0,000007	0,000004
Distancia entre la abertura principal y el último difusor (m)	15,0000	0,150000	0,112782

El agua receptora empleada será agua con sal añadida mientras que el efluente será agua dulce. Aunque la densidad de las muestras y el agua de laboratorio no coinciden, lo importante es la diferencia de densidades entre efluente y agua receptora, por tanto, simplemente se usan 15 gramos menos de sal por cada litro en el tanque y 6 gramos menos por cada litro de efluente (tabla 7). Todos los cálculos y medidas de densidad se

llevan a cabo a partir de volumetrías realizadas con un matraz aforado y una balanza de precisión. Las salinidades y/o densidades se pueden obtener a partir de la ecuación de estado del agua o a partir de una calculadora online. El agua del efluente se ha de teñir con colorante alimentario como trazador en aras de visualizar el fenómeno. Otros experimentos emplean diferentes soluciones, pero se ha optado por este método, que si bien es más lento también es más natural y benigno con el medioambiente, puesto que no se usan productos químicos.

El impulso del agua tendrá dos mecanismos bien diferenciados y con un procedimiento cada uno. Por un lado, el uso de bombas de vacío otorga una velocidad que solo depende de la configuración de la bomba y de la carga que se pierde en el sistema. Para ello se conecta la bomba a un volumen conocido midiendo el tiempo y viceversa. Siempre va a ser más exacto, una vez que conocemos la velocidad, medir el tiempo para conocer el volumen y no al revés, que solo se debe hacer para caracterizar la bomba y el sistema. Todas estas volumetrías fueron realizadas con matraces aforados, así como los cálculos de densidad (pesado de volúmenes).

Tabla 7. Escalado de magnitudes para el efluente y el agua receptora. Se comete un pequeño error entre los incrementos de densidad real ($\Delta\rho_{\text{Muestra}}=18,41$ y $\Delta\rho_{\text{Laboratorio}}=18,71 \text{ Kg/m}^3$) para poder pesar la cantidad exacta de 22 gramos de sal por cada litro de agua receptora.

Escalado del agua receptora	Volumen (m ³)	Masa Sal (Kg)	Masa (Kg)	Densidad (Kg/m ³)
Efluente (muestra)	0,00100	0,00607	1,00287	1002,87
Agua dulce del laboratorio	0,00100	0,00000	0,99620	996,200
Agua salada (muestra)	0,00100	0,03703	1,02130	1021,33
Agua salada del laboratorio	0,00100	0,02200	1,01491	1014,91

El otro procedimiento para obtener una fuerza que impulse el agua a través de la maqueta es la gravedad. Para ello se conecta el tubo cebado a un depósito cuyo volumen no haga descender en proporción la altura del líquido que contiene, ya que se asume que la altura del líquido es constante (Principio de Torricelli). Se puede hacer una mejor aproximación usando un segundo depósito, conectado en serie con el primero. Vertiendo ambos a velocidades iguales, la velocidad en la maqueta se mantiene constante en vez de disminuir a medida que se vacía el depósito principal. Esto en la práctica resulta muy complicado por lo que la solución más sencilla es usar un tanque rebosadero o hacer que un tanque normal se desborde.

Los primeros ensayos se realizarán con los parámetros a escala 1:133 (tabla 6) con la maqueta de emisario más simple, esto es, un tubo con una abertura final. Esta disposición cubre la simulación de gran parte del agua expulsada por el emisario, pero sobretodo del agua que se vierte de forma menos efectiva, y por tanto más nociva. Tomando como referencia la velocidad final medida en la inmersión al emisario, simulando solamente el agua que se expulsa por la apertura principal se puede obtener la primera conclusión de si el modelo está bien escalado. Además, en el caso de una rotura del emisario aguas arriba del tramo difusor, este modelo sería representativo de la realidad. Se probarán diferentes velocidades con diferentes configuraciones del tanque. Esto hace que se puedan observar los procesos físicos individualmente, y a partir de grabaciones en imagen y video, comparar entre los diferentes casos. Para cada velocidad (Número de Froude) de inyección se plantearán tres disposiciones diferentes: agua totalmente mezclada, agua estratificada y agua totalmente mezclada sometida a viento. Una vez que se consiguen velocidades estables y reproducibles se puede proceder con los experimentos con este modelo y añadirle los difusores laterales.

Los experimentos con el modelo complejo (añadiendo al primer diseño los 19 difusores laterales hallados en la inmersión) se realizarán con esos mismos parámetros, perforando en un tubo idéntico al del modelo simple los 19 difusores laterales. Esta configuración cubre toda el agua expulsada por el emisario a lo largo del tramo difusor. Se puede tomar como velocidad de referencia la velocidad antes del tramo difusor, esto es, la velocidad obtenida de los datos recopilados de la administración, para valorar si el modelo está bien escalado. En este caso existe un mayor tramo de tanque que va a recibir agua con colorante desde el inicio de la simulación, por lo que la importancia del video es mayor. Al igual que en los primeros ensayos se plantearán los mismos escenarios en el tanque, cada uno con diferentes velocidades. A partir de estas simulaciones surgirán problemas y se obtendrán conclusiones para refinar el procedimiento experimental y así poder añadir, en un futuro, nuevas variables o implementar técnicas cuantitativas.

Aunque se hicieron esfuerzos por buscar un sistema de recambio de agua, todos los diseños producían corrientes de succión que no eran constantes espacialmente. Dado que los volúmenes de vertido que se van a emplear son pequeños en relación a la altura que representan (un litro aumenta el volumen en el tanque aproximadamente tres milímetros) se decide no usar un recambio para el agua. Esto evita crear corrientes que no existen en la realidad.

Para medir e impulsar el caudal correcto de agua a la velocidad adecuada se deben emplear caudalímetros. Sin embargo, para diámetros y velocidades tan bajas no existen modelos precisos, por tanto, se decide medir los caudales o velocidades a partir de cronometrar volúmenes conocidos. Para asegurarse de que las velocidades son las correctas se hace pasar un volumen de agua conocido varias veces por el circuito, midiendo el tiempo del proceso y replicando el mismo tres veces antes de cada experimento.

5. RESULTADOS Y DISCUSIÓN:

A continuación, se detallan los resultados obtenidos, comentando los procesos físicos de cada prueba de forma individual a partir de las imágenes y después comparando los ensayos entre sí, dentro de cada modelo y entre ambos. Sobre los datos que aparecen en las tablas se ha decidido mostrar todas las cifras de los parámetros cuyo error es igual o menor que un orden de magnitud de 10^{-4} para que éstas resulten más sencillas de leer. En general el error obtenido para los caudales y las velocidades bajas, siendo el mayor error obtenido en un caudal (experimento 15) de $9,99 \times 10^{-7}$. Para la teoría de errores se han empleado unos errores absolutos de la viscosidad y el volumen igual a cero como aproximación.

5.1. Ensayos con el modelo simple: $F \approx 0,80$.

Los primeros tres ensayos se realizaron escalando la velocidad entre el último difusor y la abertura principal con la medida realizada en la segunda inmersión. Es decir, se analizará el vertido de la abertura principal con su caudal real aproximado

Tabla 8. Principales parámetros de las tres primeras descargas.

Nº de Experimento	Caudal (L/s)	Velocidad (m/s)	Nº de Froude	Nº de Reynolds	Condiciones
1 (fig.12)	0,0007734	0,0273518	$0,823 \pm 0,004$	$162,998 \pm 0,004$	Calma
2 (fig.13)	0,0007769	0,0274763	$0,826 \pm 0,004$	$163,740 \pm 0,004$	Estratificación
3 (fig.14)	0,0007761	0,0274269	$0,824 \pm 0,004$	$163,581 \pm 0,004$	Viento

Experimento 1:

Este primer caso (figura 12) es el más simple y también el más lento. La ausencia de viento y estratificación hace que la pluma no tenga ningún obstáculo y se estabilice en la superficie. El chorro se vuelve turbulento después de abandonar el tubo, en su

ascenso, y es más estrecho de lo normal debido a la entrada de agua salina por la parte inferior del emisario formando una cuña salina. El agua residual se vuelve muy estable en la capa superior y no se ven ondas debidas a la oscilación y las ondas internas o no existen o las que se provocan son tan largas que no son perceptibles. Parece que el único mecanismo de mezcla es el agua marina que el propio ascenso del efluente arrastra en su ascenso, aunque la velocidad horizontal derivada de la velocidad vertical de la pluma también participa.

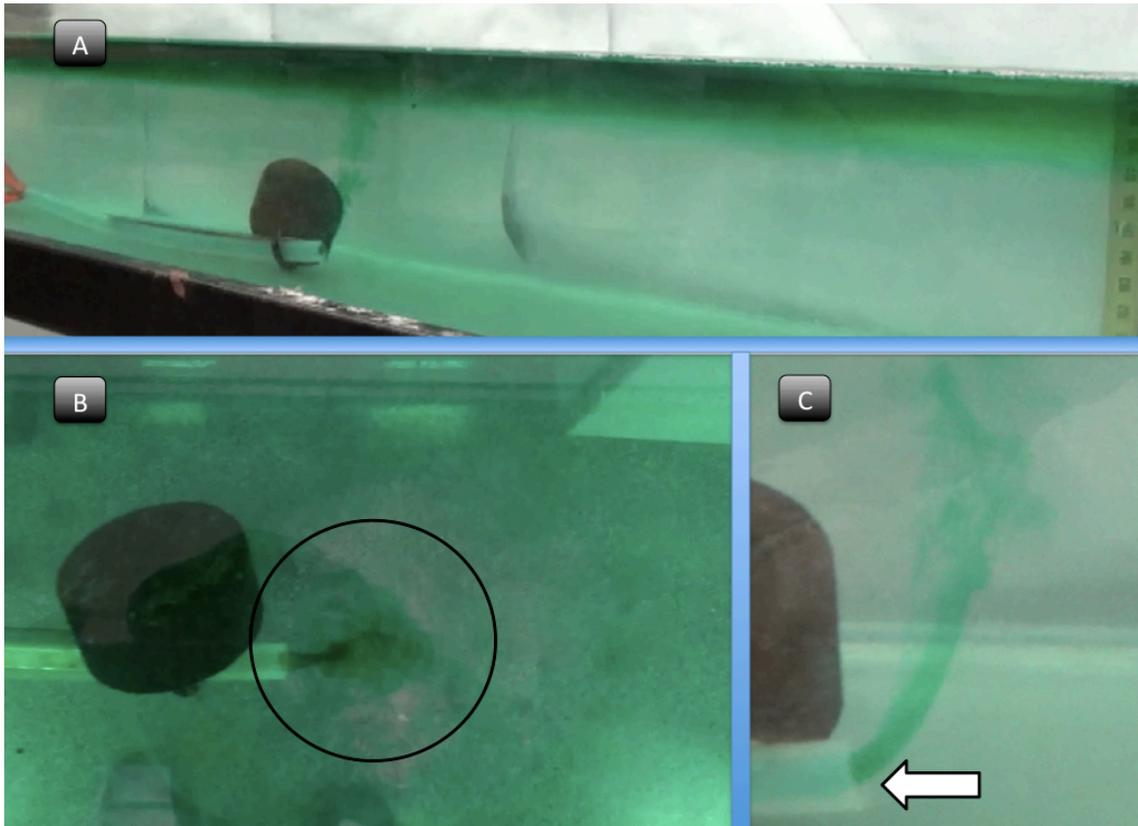


Figura 12. Fotogramas de la primera simulación: A) Estratificación muy acusada del efluente en la capa superior. B) Pequeño tamaño de la pluma y agua limpia arrastrada a la superficie. C) Intrusión salina por la parte inferior del emisario.

Experimento 2:

Al añadir estratificación al tanque se producen más fenómenos de los previstos, en primer lugar, por un defecto en el circuito que hizo que se incluyeran burbujas en el efluente. No se descarta, ya que no afecta al resultado general y la pequeña oscilación al expulsar la burbuja permite visualizar problemas que pueden surgir en el emisario. En el momento en que la velocidad sufre una oscilación se emite un pulso de contaminación tan densa como el agua receptora que permanece en el fondo de forma muy estable. Esto se debe a que, al producirse intrusión salina existe una cuña estable dentro del tubo. Cuando la velocidad disminuye penetra más cantidad de agua salada y se crea

una porción de agua que se mezcla dentro del tubo. Cuando la velocidad aumenta esa agua contaminada de densidad similar a la del medio se deposita en el fondo (figura 13.C). En cuanto al funcionamiento normal del emisario, el reguero es más estrecho de lo normal debido a la mentada cuña. El agua llega a su zona estable casi de forma vertical y por ello las primeras oscilaciones que suceden (dentro de la capa) son muy pronunciadas y a medida que se estabiliza permanece la componente horizontal. Estas oscilaciones van creando gradientes a lo largo del disco que se forma (figura 13.B). También producen ondas en la interfase de una longitud elevada (aproximadamente 50 metros en la realidad). La capa ocupa unos tres centímetros y comienza a dos centímetros de profundidad cuando se termina la simulación y no es totalmente homogénea, ya que no consigue alcanzar los bordes del tanque (figura 13.A). La propagación zonal es tan lenta en esta pluma a medias aguas que da la sensación que el agua residual se concentra alrededor de la fuente en vez de diluirse.

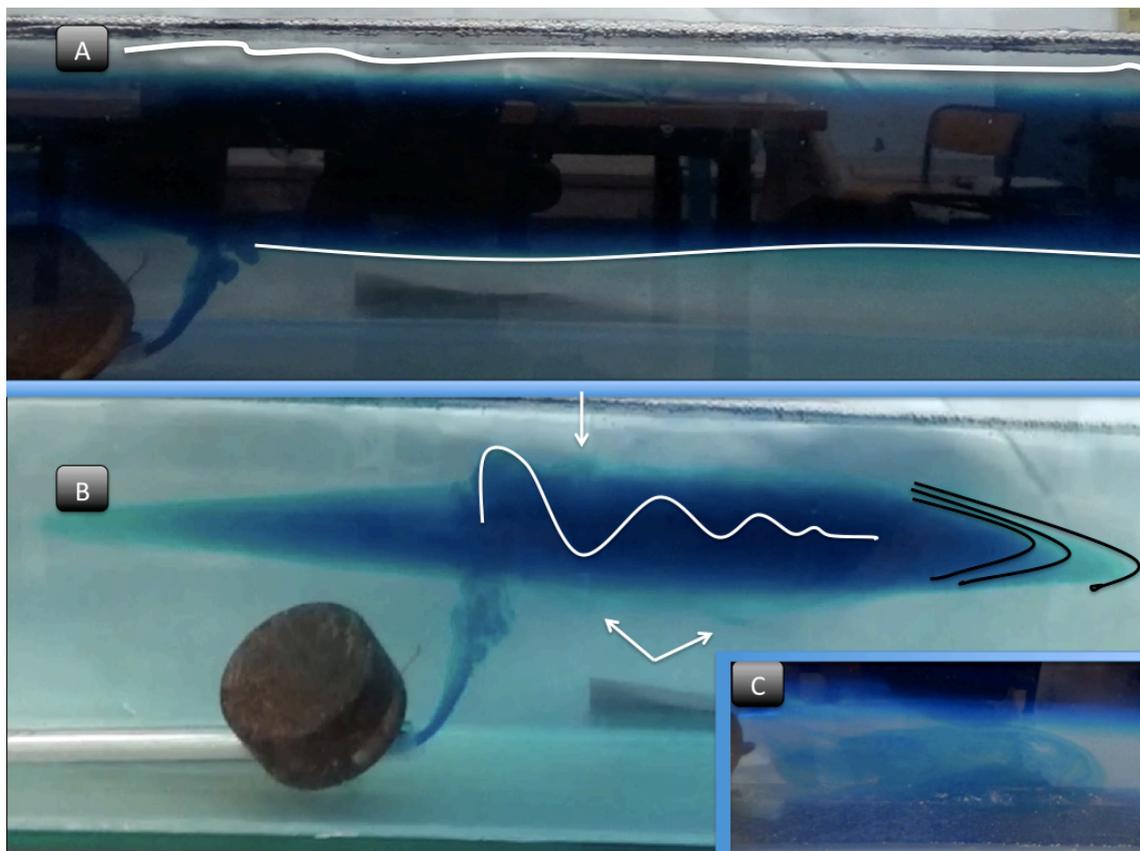


Figura 13. *Fotogramas de la segunda simulación. A) Ondas internas superior, más irregular por la turbulencia de la pluma en la primera inflexión al oscilar, e inferior, más estable. B) Oscilaciones de la pluma alrededor de su zona estable. A medida que se va mezclando el agua cambia de densidad y la altura de equilibrio se va desplazando. Esto provoca diferentes capas que se desplazan a lo largo del tanque. C) Por una fluctuación de la velocidad se expulsa parte de la intrusión salina, ya mezclada con el agua contaminada que permanece estable sobre el fondo del tanque.*

Experimento 3:

Este experimento es probablemente el más delicado en cuanto a variables ya que el viento es muy tenue y el número Fr bajo. La pluma asciende de forma que alcanza la superficie solo con componente vertical. La transformación a velocidad vertical es simétrica y no se ve influenciada por el viento o, mejor dicho, este es despreciable frente a la propia expansión de la pluma. Tampoco parece hacerlo la pluma en su ascenso. Sin embargo, se observa la formación de pequeñas ondas donde el viento coincide con la velocidad de la pluma y cizallamiento vertical donde estas velocidades son opuestas (Figura 14.A). Esto da lugar a formación de diferentes capas con un gradiente creciente de contaminación. Las ondas internas no llegan a afectar estas capas, pues apenas afectan la a la primera de las pequeñas capas (figura 14.B)



Figura14. *Fotogramas de la tercera simulación. A) Pluma muy estable a pesar del viento y cizalla vertical debido a este. B) Fuerte estratificación del efluente, aparentemente sin mezclar en la capa superior, así como pequeñas capas de efluente mezclada en la picnoclina. C) Detalle de las capas de la picnoclina en seno de la onda interna.*

5.2. Ensayos con el modelo simple $F \approx 2,2$.

Este grupo de ensayos se corresponden con la velocidad media de uso del emisario, que, en el caso de ausencia de difusores laterales no es representativa de una abertura final, pero si lo es como difusor aislado.

Tabla 9. Principales parámetros de las descargas correspondientes con el segundo trío de simulaciones con el modelo simple.

Nº de Experimento	Caudal (L/s)	Velocidad (m/s)	Nº de Froude	Nº de Reynolds	Condiciones
4 (fig.15)	0,0020242	0,0715903	2,15±0,01	426,62±0,01	Calma
5 (fig.16)	0,0020265	0,0716716	2,16±0,01	427,11±0,01	Estratificación
6 (fig.17)	0,0019635	0,0694439	2,09±0,01	413,84±0,01	Viento

En este grupo de simulaciones se ha escalado la velocidad para un número Fr similar a al que vierte el emisario antes de llegar al tramo difusor. En teoría al atravesar todos los difusores y perder carga arrojaría los parámetros del primer grupo de ensayos (sección 4.2.).

Experimento 4:

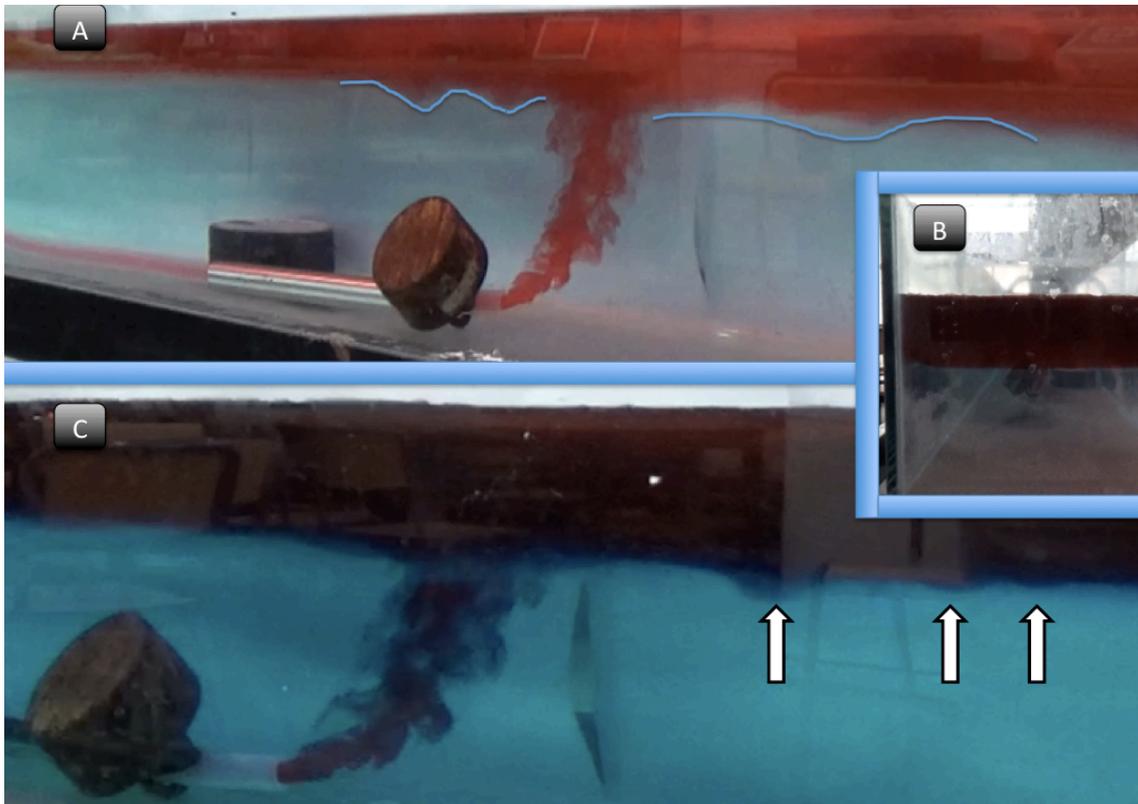


Figura 15. Fotogramas de la cuarta simulación. A) Ondas internas de longitud de onda relativamente corta respecto a su amplitud que colapsan de forma turbulenta (C). B) Capa superior muy estable con el efluente poco mezclado. C) Oscilaciones formadas por la pluma turbulenta y capas superior e inferior bien definidas y estables. La capa inferior ha adquirido algo de colorante.

El agua receptora, al estar totalmente mezclada y al ser más densa no ofrece ningún tipo de resistencia al ascenso de la pluma. Aunque ésta debería ser no turbulenta se observa como forma volutas de forma parecida al humo. Esto puede deberse al

rozamiento con el tubo o con el agua salada que penetra por la parte inferior, ambas debidas a que las fuerzas de rozamiento son más importantes que la velocidad, al ser esta muy pequeña. En este caso sería algo positivo ya que teóricamente el funcionamiento debería de ser peor. Al llegar a la superficie (su zona estable) la velocidad vertical se transforma en velocidades horizontales.

Una de las limitaciones del modelo es que el tanque es muy estrecho por lo las velocidad horizontal está sobreestimada. Esta, por diferencia de densidad oscila y forma ondas internas en la interfase. Si la velocidad es suficiente estas ondas pueden provocar cizalla. Sin embargo, este efecto es totalmente localizado en las proximidades de la pluma, y en cuanto esta deja de oscilar, la capa de contaminante ocupa la capa superior de forma muy definida y estable con un grosor de tres centímetros. La propagación es igual en ambas direcciones del tanque (figura 15). Esto es debido a que se ha perdido la fuerza de propulsión y en el punto en el que es estable solo tiene componente horizontal.

Experimento 5:

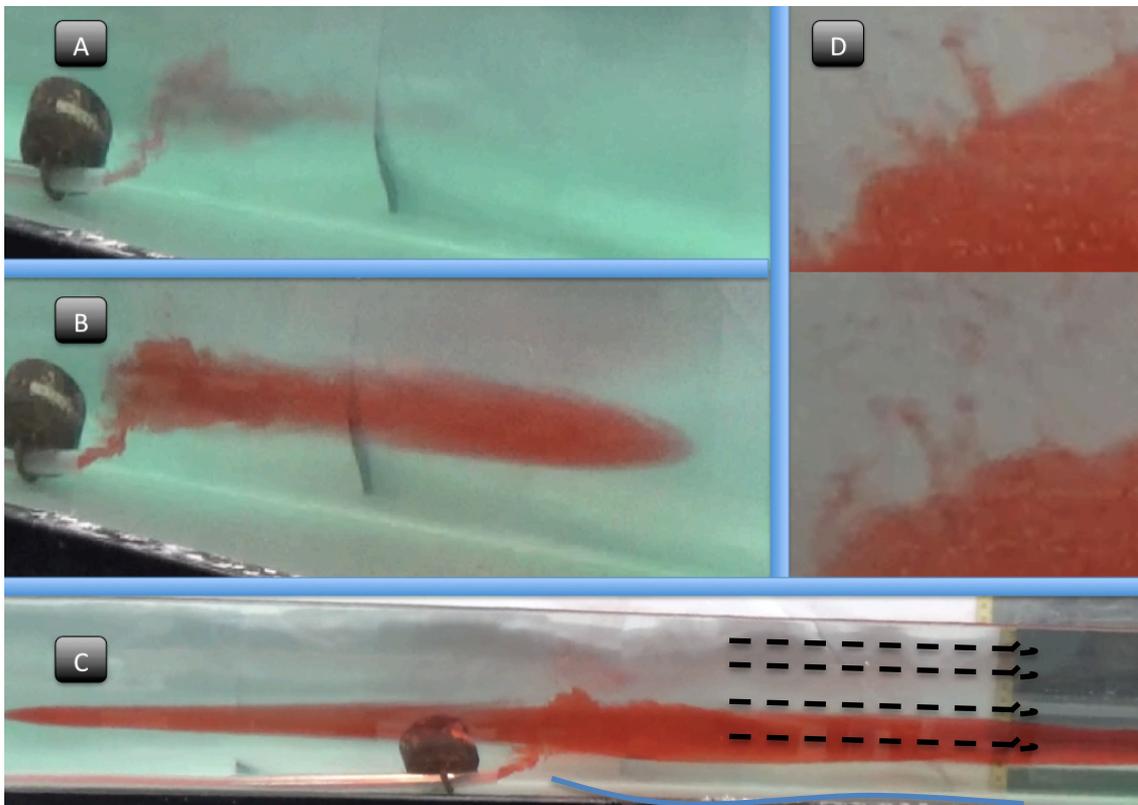


Figura 3. Fotogramas de la quinta simulación. A) Oscilaciones de la pluma similares a [19] en dirección Este. B) Se ve el avance de la pluma y su transición entre la turbulencia (izquierda) y estabilidad con diferentes capas (derecha). C) En la interfase de arriba se ven las dos primeras oscilaciones de la pluma donde ocurren vórtices toroidales

similares a dedos de sal. Este fenómeno forma una capa un poco difusa a dos cm de la superficie. En la interfase inferior la onda interna. D) Detalle de las estructuras que crean la segunda capa desde la superficie. Se llega a producir al menos una dilución apreciable en todas las capas del tanque.

Se observa que debido a la estratificación en el tanque el agua no consigue ascender hasta la superficie del mar, quedando atrapada a seis centímetros de profundidad y con una diferencia de profundidades de tres centímetros (figura 16.A). La trayectoria del chorro no es perpendicular cuando llega a su límite, rebasa la capa estable y vuelve a bajar formando parábolas hasta que se estabiliza, manteniendo un componente horizontal de la velocidad hacia la derecha (figura 16.B). No es hasta que el efluente toca el borde este del tanque que el agua empieza a fluir también hacia la izquierda, sin aumentar el grosor (figura 16.C).

Por tanto, si se pretende alejar el efluente de una zona determinada es mejor que la pluma no llegue a su zona estable solo con componente vertical. La velocidad de propagación es muy lenta y se producen giros, probablemente debido a una ligera asimetría ya que el número de Rosby es grande para esa velocidad horizontal. Lo más sorprendente es la aparición de dedos de sal en la pluma justo en el punto de inflexión de la parábola, cuando comienza a descender (figura 16.D).

Experimento 6:

Aunque el agua está totalmente mezclada se ve como la pluma duplica su diámetro de forma brusca al llegar a la profundidad de influencia del viento. Aún así alcanza la superficie, donde se hace estable. Existe una pequeña turbulencia al abandonar el emisario, al igual que en el apartado anterior. Se puede ver que las ondas que se forman por las oscilaciones son más irregulares e inestables, generando una capa entre el agua de mar y el efluente donde se está produciendo mezcla.

Finalmente se forman tres/cuatro capas que son homogéneas tanto de forma zonal. Son de algo más de cuatro centímetros cada una y la intermedia tiene una zona superior más inestable donde se sigue produciendo mezcla, y todas ellas son homogéneas zonalmente. Esto es importante ya que muestra que el viento es un mecanismo de mezcla, y su velocidad de desplazamiento hacia la costa no es perceptible y no desplaza agua en comparación con la velocidad de la propia pluma al esparcirse, sin embargo, la dilución que provoca es perfectamente visible (figura 17).

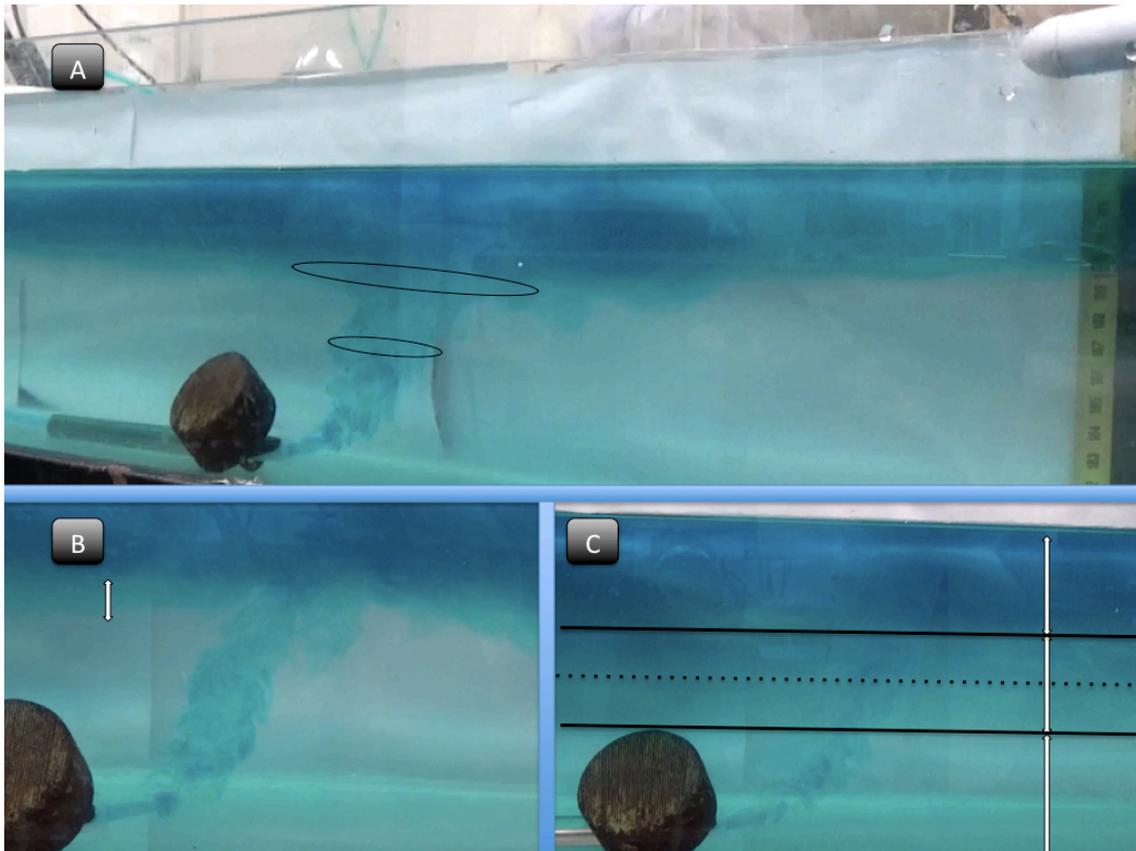


Figura 17. Fotogramas de la sexta simulación. A) La pluma turbulenta se expande de forma notable. Se produce una dilución en todos los niveles del tanque, aunque el efluente se acumula en la capa superior. B) Con el paso del tiempo se empieza a definir una capa de mezcla que acaba desembocando en tres capas bien definidas y con un gradiente creciente en la concentración de contaminante (C): una capa superior con mayor concentración, una capa central con una subcapa superior donde se esta produciendo mezcla debido al viento y una subcapa inferior formada a partir de esa mezcla, y una capa inferior donde el efluente solo se mezcla por la turbulencia de la pluma al salir del emisario.

5.3. Ensayos con el modelo simple: $F > 3,6$.

Este grupo de ensayos se compone de simulaciones a velocidades o números de Froude mayores que el caudal máximo de obra ($F \approx 3,6$). Permite conocer si con el diseño más sencillo es posible un buen rendimiento solo incrementando la velocidad.

Tabla 10. Principales parámetros de las descargas correspondientes con el tercer trío de simulaciones con el modelo simple.

Nº de Experimento	Caudal (L/s)	Velocidad (m/s)	Nº de Froude	Nº de Reynolds	Condiciones
7 (fig.18)	0,0048028	0,170±0,001	5,11±0,53	1012,29±0,03	Calma
8 (fig.19)	0,0048068	0,170±0,001	5,11±0,53	1013,11±0,03	Estratificación
9 (fig.20)	0,0048052	0,170±0,001	5,11±0,53	1012,77±0,03	Viento

Experimento 7:

El agua receptora, homogénea y en reposo acoge una pluma muy turbulenta. Se ven dos comportamientos similares de misma causa, pero en zonas diferentes, ya que el chorro en primer lugar es turbulento debido a la propia velocidad vertical del chorro y a medida que la velocidad de ascenso aumenta se produce una segunda turbulencia debido a la aceleración provocada por la flotabilidad (figura 18.A). Al llegar a la superficie (su zona estable) la velocidad vertical se transforma en velocidades horizontales relativamente pequeñas ya que la capa en la que transcurren es de gran tamaño. De hecho, la velocidad hacia el Oeste es mínima ya que al llegar a la superficie la pluma aun conserva la componente advectiva de la velocidad inicial. Las ondas que se forman en la interfase son cortas casi con la misma amplitud que longitud y se desplazan rápido (figura 18.A). Todo esto hace que se produzcan muchos fenómenos en esta frontera entre los cuerpos de agua. En primer lugar, la velocidad horizontal provoca mezcla debida a las fuerzas de cizallamiento en todo el tanque y eso dificulta o enmascara otros procesos. El más insólito es el colapso de las ondas derivadas de la oscilación del chorro, de forma análoga al proceso de formación de un frente polar: el seno se desestabiliza y colapsa extrayendo una parte de su masa y expulsándola hacia una zona que, por estabilidad, no le corresponde. Esto hace que la onda pierda energía y se vuelva, de nuevo, constante (figura 18.C).

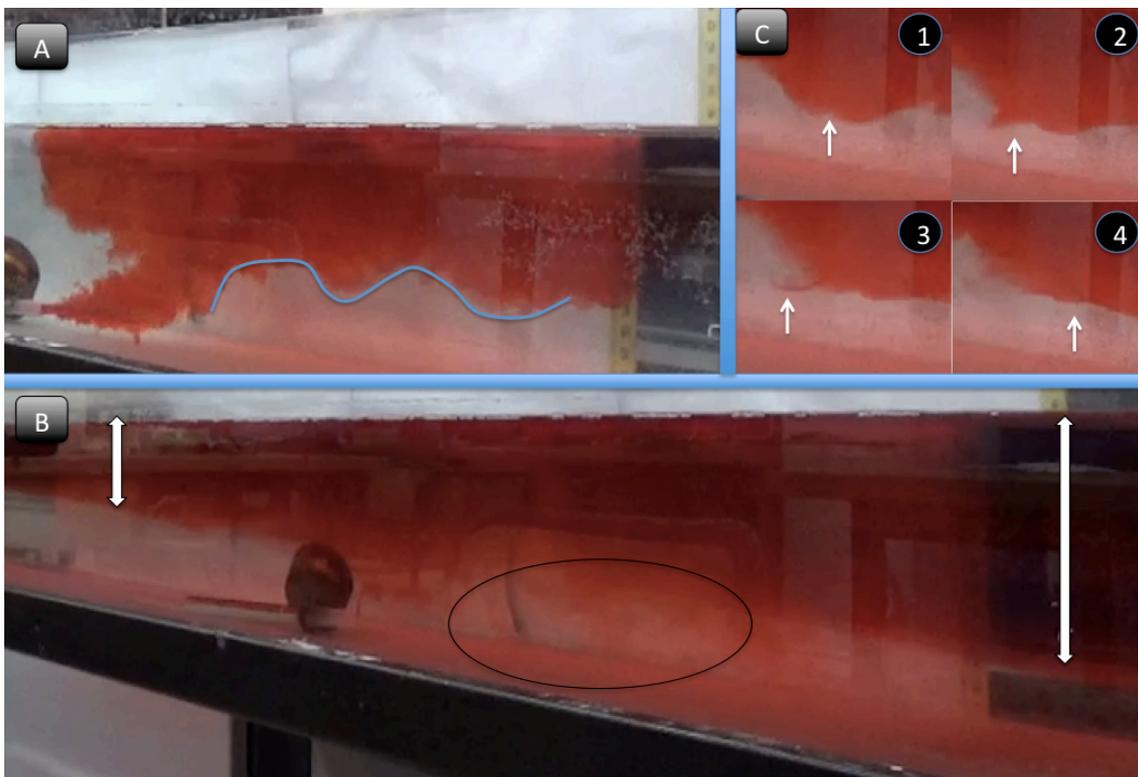


Figura 4. *Fotogramas de la séptima simulación. A) Pluma muy turbulenta con ondas internas cuya longitud de onda es casi como su amplitud hasta que colapsan y se*

produce una intrusión de parte de la onda en la capa inferior (C). B) La capa superior es variable en espesor debido a que el chorro conserva velocidad horizontal. La capa inferior ha adquirido un tono rojo debido tanto a la turbulencia de la pluma como a la de la onda.

Es un caso donde es muy clara la importancia de una primera buena dilución, ya que además de la propia mezcla inicial se crea una cadena de eventos que favorecen la dispersión de los contaminantes en el agua. Al observar el tanque al final de la simulación se puede ver que la capa superior no es constante en grosor (que varía entre seis y ocho centímetros) y composición ya que la interfase no está bien definida (difusión) en incluso el agua de fondo ha adquirido algo de color, probablemente debido a “frentes polares” ya que solo se observa esta coloración en la zona donde las ondas internas colapsaban (figura 18.B). Además, la propagación no es igual en ambas direcciones del tanque, ya que no se ha perdido la fuerza de propulsión en el punto en el que el chorro es estable. Esto es algo positivo en cuanto a que demuestra experimentalmente que es posible alejar el agua residual de la costa o al menos reducir la cantidad que llegue.

Experimento 8:

En este caso el mar está estratificado cuando recibe el chorro. Este se divide en dos comportamientos. Una parte inmediatamente se diluye y pasa a ser estable. La otra, aún dulce, asciende e intenta oscilar hasta encontrar su zona sin embargo al descender ya se topa con la capa de agua que se está formando a media agua por lo que su amplitud se ve truncada (figura 19.B). Estas oscilaciones forman en la parte superior una onda interna de gran longitud justo bajo el agua menos densa y sin teñir de la superficie (figura 19.A). La tercera capa en profundidad son en realidad muchas capas de agua que se mezcla debido a la turbulencia de la emisión.

Como la primera capa queda retenida cerca de la zona donde se produce dicha mezcla a medida que pasa el tiempo el efluente tiene más difícil su dilución y va formando capas. Se pueden ver las plumas que forman en la zona izquierda del tanque donde no existe la perturbación del chorro. Además, en esta zona el grosor es mínimo (de unos dos centímetros) comparados con la dirección de mar abierto donde es máximo y alcanza los ocho centímetros) (figura 19.C). Este efecto puede estar sobreestimado por los límites físicos de el tanque. Esto indica que sumada a una buena mezcla inicial la estratificación incrementa la posibilidad de alejar el agua nociva de la costa. No se puede determinar si incrementa la homogenización del contaminante debido al límite físico.



Figura 5. *Fotogramas de la octava simulación. A) Capa intermedia donde queda estable el efluente variable en grosor con ondas internas en la interfase superior. B) La onda de la interfase inferior no se observa debido a la propia velocidad del chorro que además trunca las oscilaciones de la pluma. C) La estructura de la columna es una capa de agua limpia superior que encierra un agua residual bien mezclada en la dirección del chorro y dos capas de agua limpia encerrando a dos cm del fondo una capa formada por lóbulos de efluente peor mezclada y más estable que se desplaza hacia el Oeste.*

Experimento 9:

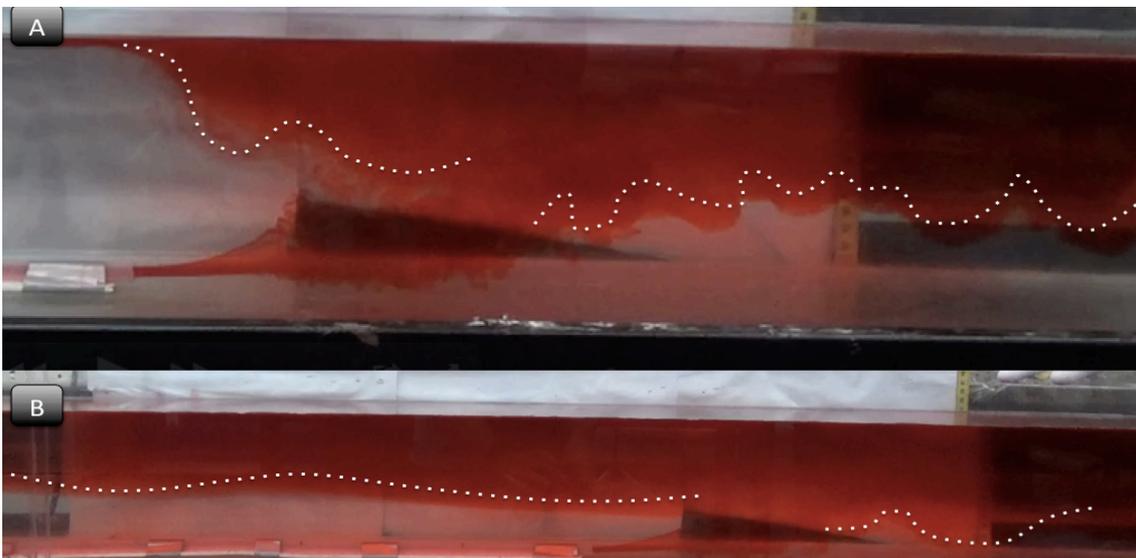


Figura 20. *Fotogramas de la novena simulación. A) Dos patrones de ondas diferentes: a la derecha ondas con longitud y amplitud similares, poco estables y que emiten vórtices a la capa inferior. A la izquierda ondas más largas y estables. B) Los mismos patrones, que, con la columna de agua más estable y la interfase formada, se transmiten de forma más constante.*

Este caso es similar a la octava simulación, sin embargo, al añadir el viento al modelo la pluma desarrolla una velocidad hacia el oeste. En esa misma dirección la onda interna

es más estable y menos energética, justo al contrario que hacia mar abierto, donde la longitud de onda es similar a la amplitud. A pesar de su energía no llega a emitir vórtices a la capa inferior. Tampoco parece producirse cizalla vertical debido al viento. Esto puede ser debido a la velocidad elevada del efluente en comparación con la baja velocidad del viento (figura 20.A). No obstante, la propia turbulencia generada en la inyección es suficiente para difundir el colorante a todas las capas del tanque,

5.4. Ensayos con el modelo completo:

En esta sección, la maqueta del emisario consta de los diecinueve difusores laterales perforados a la mitad de la altura del tubo por lo que ya no se debe emplear la velocidad entre el último difusor y la abertura principal en los experimentos.

Tabla 11. Principales parámetros de las simulaciones con el modelo completo.

Nº de experimento	Caudal (L/s)	Velocidad (m/s)	Nº de Froude	Nº de Reynolds	Condiciones
10 (figs. 21 y 22)	0,001175	0,041559	1,24±0,04	247,667±0,006	Calma
11 (fig.23)	0,001717	0,072887	2,19±0,12	434,35±0,01	Calma
12 (fig.24)	0,001366	0,072486	2,18±0,07	431,966±0,009	Estratif.
13 (fig.25)	0,003263	0,115422	3,47±0,32	687,83±0,01	Viento
14 (fig.26)	0,003323	0,117528	3,53±0,33	700,385±0,01	Estratif.
15 (fig.27)	0,008239	0,291±0,002	8,76±0,98	1736,57±0,04	Calma

Experimento 10:

Aunque esta simulación resultó ser un error derivado de la arquitectura del modelo, sirve para ver problemas reales que pueden surgir en el emisario. En este caso (y en el siguiente) las velocidades son menores que las esperadas debido a que, en el punto donde el tramo difusor está desplazado hacia arriba se acumulan burbujas en la zona superior del tubo.

Esto genera dos zonas bien diferenciadas, que a medida que el gas va siendo expulsado se desplaza hacia el oeste. En los primeros difusores el flujo es turbulento y se forma una capa ancha en la superficie que acaba resultando en dos capas y por último a un gradiente vertical, sin embargo, en los últimos difusores el flujo es casi inexistente y forma una capa muy fina y concentrada de contaminante. No es hasta que el emisario consigue expulsar la mayor parte del aire cuando consigue mezclar el agua a lo largo de todo el tramo (figura 21).

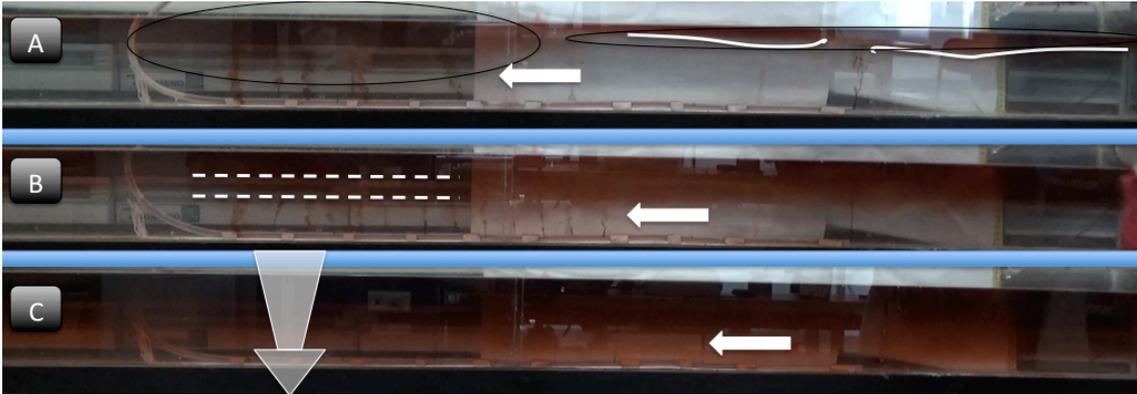


Figura 21. Fotogramas de la décima simulación. Secuencia temporal donde (A) las plumas alcanzan la superficie bien mezcladas formando una capa ancha hasta la avería. (B) La obstrucción se va desplazando hacia el Este y con ella la capa bien mezclada. C) Se forma un gradiente vertical del contaminante con una capa superior diferenciada creada por la pluma de la abertura final, que durante todo el proceso ha estado vertiendo a un número Fr extremadamente bajo.

Al intentar repetir el experimento sin los problemas se observan desde el principio todos los difusores, sin embargo, debido a que se vuelven a acumular burbujas durante el proceso la velocidad es menor que la esperada. En general la velocidad y turbulencia de los difusores desciende la aproximarse al final del emisario. Justo antes de la elevación aumenta ya que la cuña salina y las burbujas estrangulan el flujo. El último difusor lateral no vierte, dado que el nivel de la intrusión salina supera su altura (figura 22).

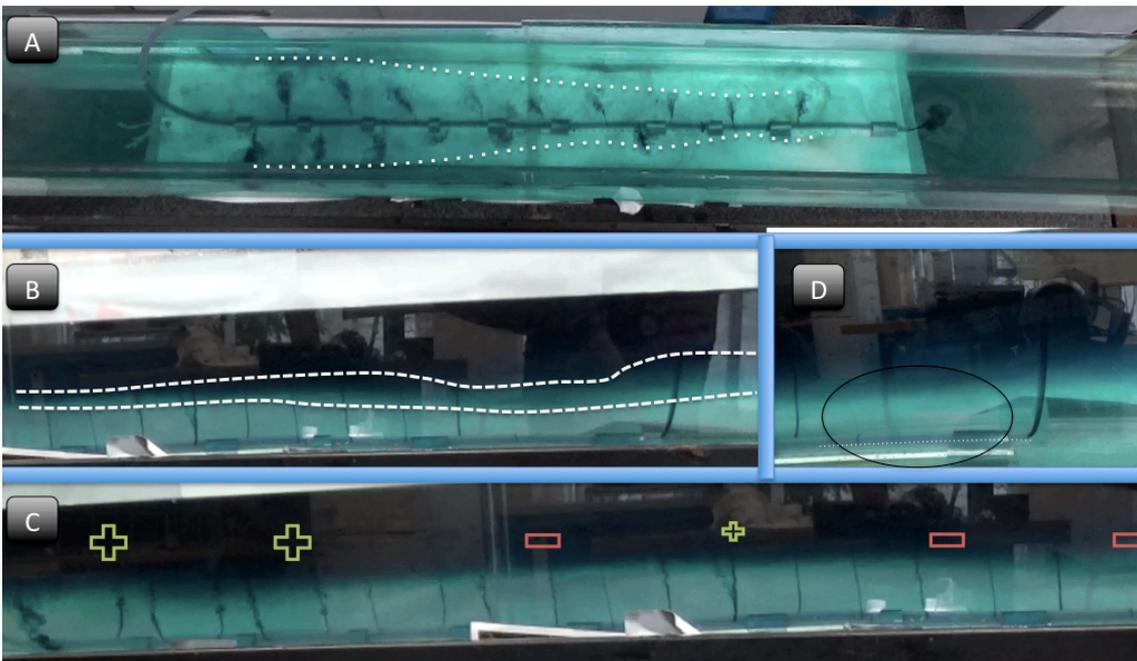


Figura 22. Fotogramas de la décima simulación. A) Perfil decreciente de velocidades. B) Hundimiento de las capas más someras debido a la falta de fuerza boyante provocada por la ausencia de flujo en los últimos difusores. C) Variación de la velocidad. D) Detalle de un difusor lateral que no vierte debido a la altura de la intrusión salina.

a lo largo del tramo difusor con una obstrucción pequeña a la altura de la elevación. D) Nulo funcionamiento del decimonoveno difusor lateral.

Experimento 11:

En esta simulación al fin se consigue la velocidad original del emisario. En este caso al no existir perturbaciones en la velocidad las dos zonas diferenciadas del experimento 10 forman dos capas diferentes. La capa superior es homóloga a la del experimento número uno a lo que se le añaden diferentes capas (una por cada difusor) que interaccionan entre si formando una capa de mezcla oblicua (figura 23.A).

Al final aparecen tres capas con un gradiente creciente de contaminante que interaccionan entre sí mezclándose por medio de la propagación de las ondas internas y el propio flujo de los difusores. Las ondas internas tienen dos interfases principales donde propagarse y aunque solo son visibles las generadas por la pluma principal, por el grado de difusión que ocurre en los primeros centímetros del emisario se puede deducir que estas oscilaciones se producen a menor escala a medias aguas, provocadas por los difusores laterales (figura 23.B). Esto solo sucede cuando las plumas laterales dejan de llegar a la superficie y se estabilizan, lo que solo sucede cuando la capa superior está totalmente ocupada por la pluma principal. Dado que en la realidad estas plumas no alcanzan la superficie es posible que la capa superior del mar en la zona esté mas contaminada de lo esperado.

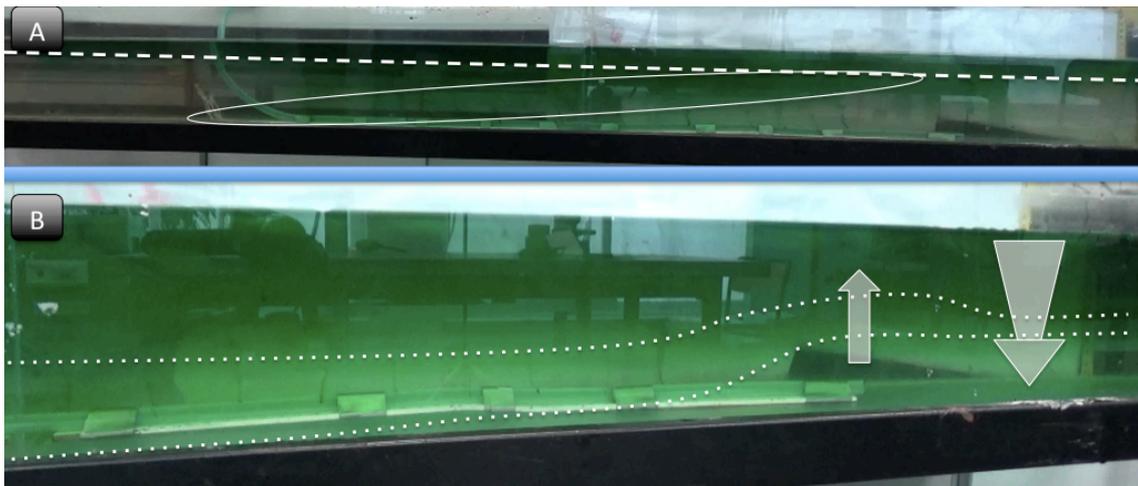


Figura 23. Fotogramas de la undécima simulación. A) Capa superior formada por la pluma principal sobre una capa con un gradiente de mezcla decreciente. B) Capas muy mezcladas entre sí, aparentemente perturbadas sólo por la pluma principal.

Experimento 12:

Empleando, de nuevo, el número Fr medio de 2017, esta vez con un mar estratificado, se observa un mayor número de procesos de mezcla. Aunque se vuelve a formar el disco, esta vez sucede en los primeros difusores que interactúan entre sí. El gradiente decreciente de velocidades, inversamente proporcional a la altura que alcanzan las plumas, es evidente (figura 24.A). En el punto más alto de la oscilación de cada pluma produce un giro similar a una inestabilidad Kelvin-Helmholtz (figura 24.B). Debido a que el agua expulsada queda atrapada entre la capa superficial y el efluente que se continúa vertiendo se desplaza a gran velocidad en esa interfase provocando este fenómeno. Esto hace que toda el agua del tanque reciba una parte de colorante, no obstante, se acaban formando una superposición de capas lobuladas en cuyo punto central la concentración de colorante es máxima y decrece hacia los extremos (figura 24.C).

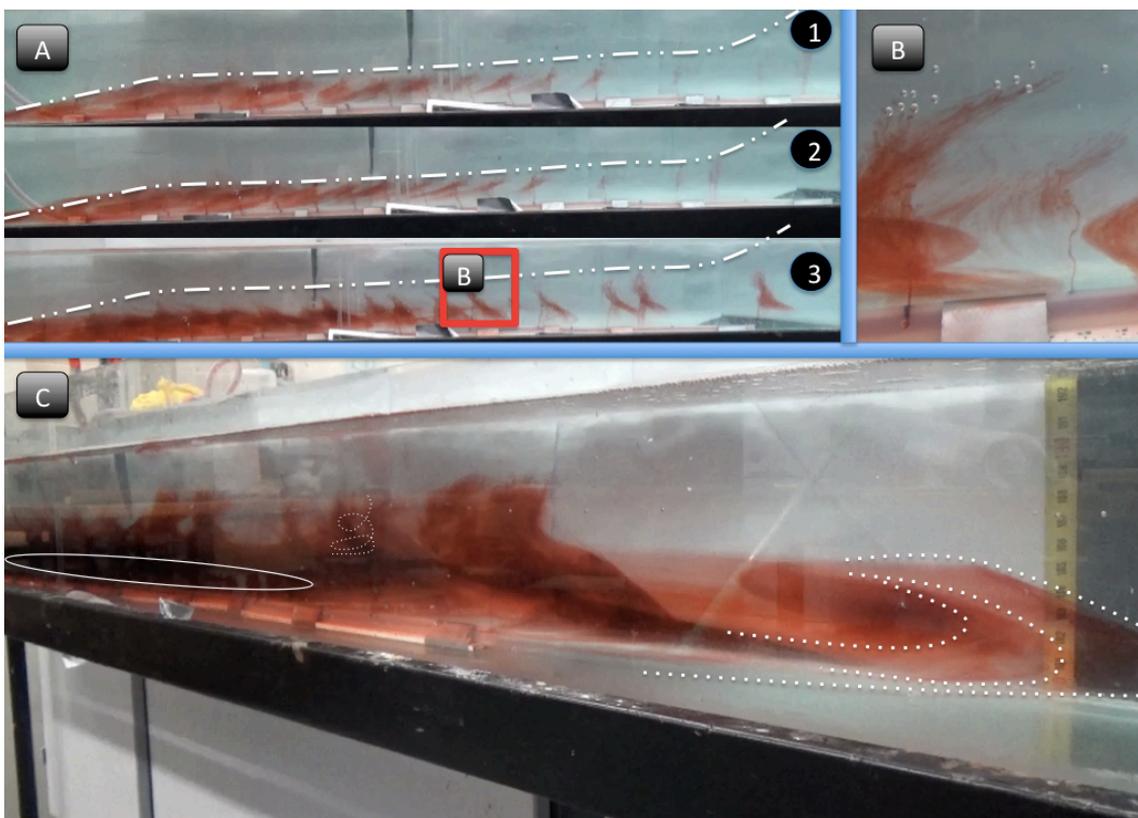


Figura 24. *Fotogramas de la duodécima simulación. A) Secuencia temporal del gradiente de velocidades y de formación de estructuras de cizalla vertical para cada pluma. B) Detalle de la inestabilidad provocada por la fuerza cortante. C) Capas superpuestas sobre la zona de máxima concentración y giros en la interfase superior aportando contaminante a la capa fótica muy diluido.*

Experimento 13:

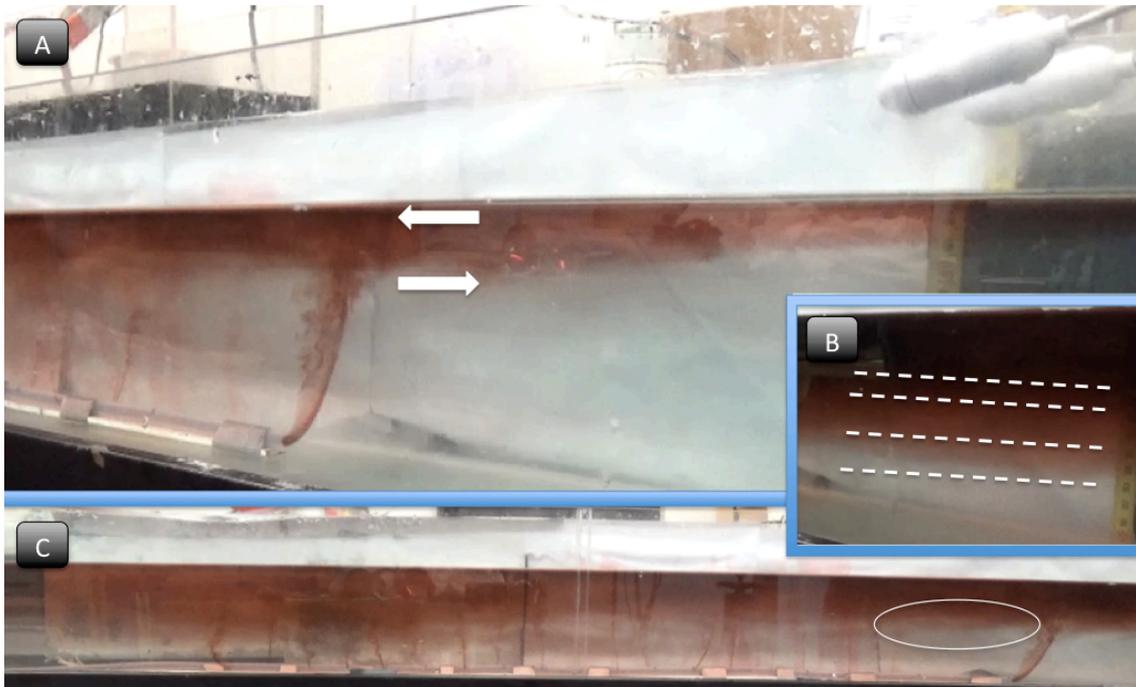


Figura 25. Fotogramas de la decimotercera simulación. A) Detalle del cizallamiento de la pluma debido a las velocidades opuestas de esta y el viento. B) Capas formadas en la interfase entre la capa superficial y la del fondo. C) Detalle de la onda interna viajando por encima del difusor que no emite.

En este experimento se vuelve a reproducir una ligera fuerza de cizallamiento debido al viento (figura 25.A). En general debido a la cantidad de difusores laterales y al viento no se consigue apreciar las ondas internas excepto en el último difusor, dado que no emite agua (figura 25.C). El grado de dilución, al coexistir estos dos procesos sumados a la turbulencia de los primeros chorros, es muy bueno. La pluma principal, que llega a la superficie sin componente horizontal de velocidad se diluye fácilmente (gradiente horizontal). Entre la capa superficial y la de fondo, la formación de capas debidas al viento se observa a la derecha de la pluma principal. Aunque también sucede en el resto del tanque no es visible por el caos que se produce entre el efecto del viento, las ondas internas y la turbulencia de cada difusor (figura 25.B).

Dado que los parámetros de esta simulación se corresponden con el caudal máximo de obra son unos resultados que no se pueden obtener de forma continua en la realidad, sino que esta velocidad sólo se emplea en determinadas ocasiones.

Experimento 14:

De nuevo empleando el caudal máximo de obra y esta vez con el mar estratificado se observan estructuras similares al experimento 12, un gradiente decreciente de densidades, dos zonas de mezcla diferenciadas, capas lobuliformes y cizallamiento vertical. En este caso, como la velocidad es mayor la pluma principal crea una zona de carga de color alta a media agua que se desplaza al este, pues conserva parte de su velocidad inicial. Se forma otra zona de alta concentración encima del tramo difusor, donde los chorros interactúan entre sí. En la mayor altura que estos consiguen alcanzar se producen inestabilidades y giros tipo Kelvin-Helmholtz (figura 26).

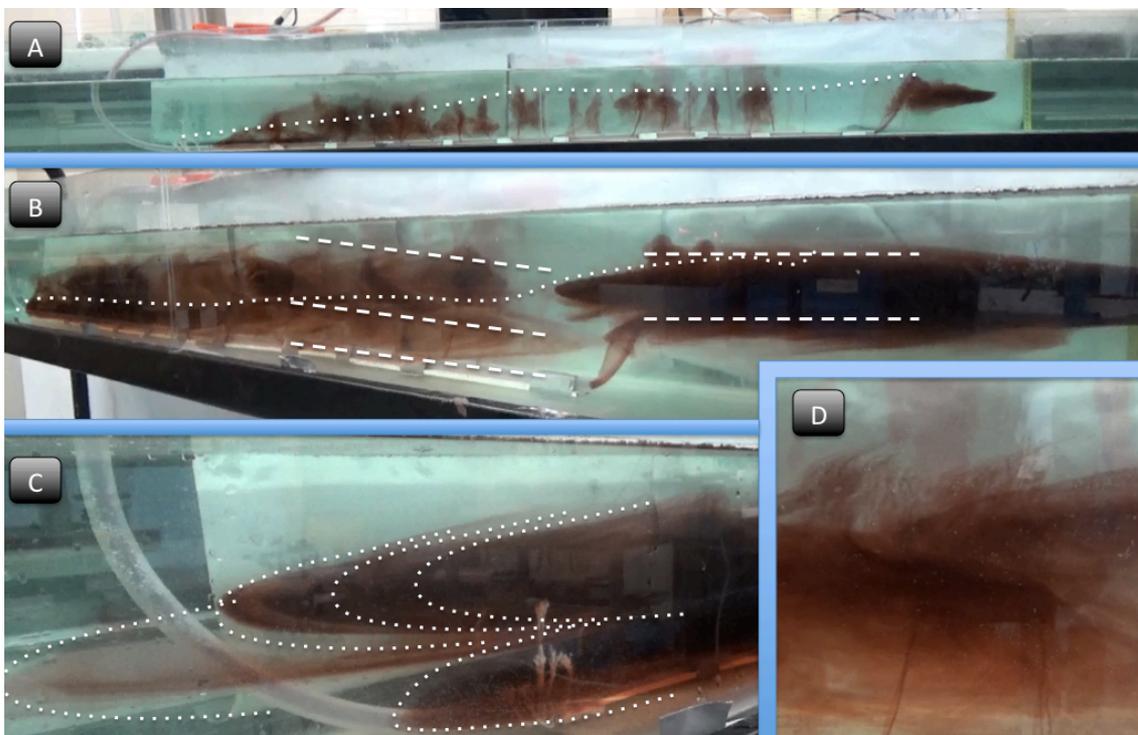


Figura 26. *Fotogramas de la decimocuarta simulación. A) Gradiente de velocidades horizontal y pluma principal desplazándose al este. B) Formación de capas. Mientras que las formadas por los difusores laterales interactúan entre ellas y mezclándose mejor la pluma de la abertura principal es muy estable y homogénea. C) Detalle de las diferentes capas formadas por los diferentes difusores laterales, que lejos de la perturbación del tramo difusor desarrollan estructuras muy fácilmente visibles. D) Cizallamiento de los chorros al sobrepasar la altura de equilibrio.*

Experimento 15:

En esta prueba no se emplearon velocidades relacionadas con los datos obtenidos, sino que, para comprobar si un simple aumento de caudal (potencia en las bombas) puede verter de forma eficiente aún con un diseño primitivo.



Figura 27. Fotogramas de la decimoquinta simulación. A) Diferencia entre las zonas del tramo difusor en cuanto a turbulencia y su capacidad de mezcla. B) Capa superior en gradiente positivo y capa inferior, menos contaminada y homogénea.

Sí se observa, de forma muy clara, que el rendimiento de la primera parte del tramo difusor es excelente hasta el octavo difusor al igual que en los anteriores experimentos. Existe una zona de transición donde los chorros van decreciendo en turbulencia hasta que el efluente surge por flotabilidad. Aunque en general se puede decir que la mezcla ha sido buena, esta solo se produce en los primeros 8-12 difusores laterales (tal como fue observado en la primera inmersión). La realidad es que hay una capa superior que apenas ha sido diluida, formada por los últimos difusores y la abertura principal. Por tanto, aún triplicando el caudal, la zona que vierte con un buen rendimiento sigue siendo la misma y los problemas de funcionamiento del emisario se deben a un error en su dimensionamiento (figura 27).

6. CONCLUSIONES:

En este capítulo final se recogen las principales reflexiones que se han desprendido tanto del propio trabajo en sí, como de las posibilidades que permite, como herramienta, disponer de una maqueta calibrada del emisario para futuras investigaciones.

6.1. Sobre las inmersiones:

La pluma del vertido llega con demasiada fuerza boyante a la superficie, formando un parche de agua menos densa que se advecta en todas las direcciones por igual ya que el efluente pierde la componente horizontal de velocidad en su ascenso. Esto hace que el emisario resulte muy sencillo de encontrar incluso por embarcaciones sin instrumentación electrónica. Si estas embarcaciones, profesionales o no, no se

comportan de manera responsable con sus sistemas de fondeo o aparejos pueden ocasionar desde pequeños problemas en el correcto funcionamiento del tramo difusor hasta averías graves.

Por otra parte, la pérdida de velocidad a lo largo del tubo es evidente ya que no existe ninguna reducción de sección para compensar las continuas pérdidas de carga laterales. Según las observaciones visuales los ocho primeros difusores tienen un régimen de flujo altamente turbulento que se transforma en laminar a partir del difusor número trece. Esto hace que en la apertura principal se produzca intrusión salina. La cuña que se forme tendrá una velocidad contraria a la del efluente lo que da lugar a la acumulación de sedimentos. Por tanto, para solucionar estos problemas, se debería de tener en cuenta una reducción progresiva del tramo difusor a la hora de modificar o reparar el emisario. Esta idea se ve reforzada por el resultado del experimento número 15, que indica que no es un problema de velocidades, sino de diseño del tramo difusor.

6.2. Sobre los procesos observados en el tanque:

La primera idea que se percibe al desarrollar estas simulaciones es la misma que observa Osborne Reynolds al realizar sus ensayos sobre la turbulencia: las condiciones iniciales influyen notablemente en el desequilibrio del flujo laminar. Cualquier perturbación, por pequeña que sea, da lugar a la formación de volutas, incluso cuando la velocidad es baja. Esto se ve de forma muy clara cuando se usan bombas con números de Reynolds y Froude bajos pero cuyas velocidades no son constantes. Las fluctuaciones en la velocidad se traducen en turbulencia en la pluma.

En general el modelo permite visualizar todos los fenómenos esperados en el tanque (plumas turbulentas y laminares, ondas internas, estratificación, formación de capas, cizallamiento e inestabilidades) y algunos otros no esperados como giros o estructuras similares a dedos de sal.

Las ondas internas son el principal proceso de mezcla cuando la pluma asciende hasta la superficie sin estratificación de forma no turbulenta ($Fr < 1$), pero estas ondas tienen muy poca energía. En este caso, que corresponde con los últimos difusores y la abertura del emisario, el efluente asciende con un comportamiento laminar y alcanza la superficie casi con las mismas propiedades por lo que forma una capa muy estable. Este hecho sumado a la poca energía de las ondas internas hace que este sea el caso más desfavorable para evitar problemas con la polución. Sin embargo, si estas ondas

internas estas son suficientemente energéticas pueden llegar a producir cizalla vertical que ayuda en el proceso de dilución. No obstante, cuando esto sucede, está relacionado con plumas turbulentas ($Fr > 1$) con lo cual el efluente al alcanzar su altura de equilibrio está mejor mezclado y es la propia pluma el principal proceso de mezcla. A partir de esa primera dilución las ondas internas se vuelven más efectivas dado que la columna es menos estable. Por tanto, el modelo permite visualizar el efecto de la primera dilución.

A medida que se añaden variables al tanque (viento, estratificación), sucede lo mismo. Cuando $Fr < 1$ son los fenómenos no turbulentos los que dominan el (pobre) proceso de mezcla. En el caso del viento se consigue observar con claridad la formación de capas por su efecto, mientras que la presencia de estratificación favorece los procesos de cizallamiento. Si $Fr > 1$ la turbulencia de la pluma es el fenómeno de mezcla dominante y los procesos mencionados anteriormente se vuelven más efectivos.

No se ha conseguido, en ninguno de los experimentos, un flujo turbulento en la sección final del tramo difusor, incluso con velocidades muy superiores a las recomendadas. Debido a este hecho se concluye que es el diseño del propio tramo difusor, y no la velocidad a la que se vierte, lo que provoca que el emisario funcione de manera ineficiente. Por tanto, se propone la reparación del mismo emisario o la construcción de uno nuevo reduciendo progresivamente la sección del tramo difusor para compensar las pérdidas de carga.

6.3. Sobre el propio experimento:

En muchas ocasiones a pesar del escalado y debido a prioridades (en este caso la costa sobre el mar abierto) hizo que en algunos experimentos se perdiese o perturbase la información debido a los límites físicos del tanque, en especial en los casos simples de números de Froude elevados, dada la velocidad zonal del efluente en dirección Este, por lo que se propone o recomienda representar más ese tramo de costa. En los experimentos con estratificación se pueden tomar muestras del tanque para verificar la existencia de dos capas, pero ello causará perturbaciones en el agua. Una forma de comprobar, una vez en reposo, la estratificación en el tanque es buscar la presencia de burbujas que no pueden atravesar la haloclina (picnoclina) y ayudan a trazarla.

Aún teniendo en cuenta que el procedimiento experimental tiene un amplio margen de mejora, ha permitido, visualizar todos los procesos esperados con un muy buen grado de aproximación a las medidas reales, es decir, el escalado de las magnitudes es lo

suficientemente preciso para validar el modelo como una herramienta útil de investigación. El modelo no se puede validar para todos los usos, sin embargo es lo suficientemente preciso, como se puede observar comparando los números de Froude de la tabla 4 (emisario real) con los de las tablas 8, 9 10 y 11, para simular los regímenes medio y máximo con un error relativo aproximado del 1 y 3% respectivamente. Sin embargo en el caso de querer simular el régimen final el error es del 33%, por lo que el modelo no es válido para ésta situación.

6.4. Ideas de futuro:

Aunque el objetivo no es cuantificar la dilución, desde un punto de vista analítico, esta puede ser medida de diferentes formas usando el modelo, siendo la más clara emplear un espectrofotómetro siempre que se conozca la concentración inicial del colorante; también con sistemas ópticos para detectar color o por medio de análisis de imagen se pueden obtener datos numéricos de la simulación asociables a una concentración.

Desde un punto de vista más teórico, y en la misma línea de obtener datos cuantitativos, existen diferentes medidas que se pueden obtener de los procesos físicos observados en el modelo, como los parámetros de las ondas internas (longitud, amplitud, frecuencia, etc.), de la pluma (altura, profundidad de estabilidad, velocidad de propagación, etc), del tamaño y número de capas formadas, y en general, los tamaños y velocidades de cualquier proceso observado para caracterizar su escala espaciotemporal.

Por último, en cuanto al tramo difusor, se propone la combinación de un modelo similar al creado en este trabajo con la tecnología de impresión 3D para simular diferentes diseños de dicho tramo. En el momento en el que se escriben estas líneas se ha producido la rotura completa del emisario a 10 metros de profundidad y a un kilómetro de la costa, vertiendo todo el efluente por la luz del tubo, por lo que, en caso de acometerse la necesaria reconstrucción o reemplazamiento del emisario, una forma efectiva y económica de estudiar el caso es el uso de este modelo a escala.

7. BIBLIOGRAFÍA

- Agroambient.gva.es. (2019). *Conselleria d'Agricultura, Medi Ambient, Canvi Climàtic i Desenvolupament Rural*. [online] Available at:<http://www.agroambient.gva.es/documents/20550103/164987813/Visita+8+-+EDAR+Gand%C3%ADa-La+Safor/54abecb2-8e4b-4527-b3f6-04538a59ecdc;jsessionid=F51B4C1409A3C197767F2595B9CE713C>.
- Anandón R., Duarte C.M. & Celso Fariña A. 2005. Impactos sobre los ecosistemas marinos y el sector pesquero. Impactos del cambio climático en España 4: 148-182.
- Ansong, J. and Sutherland, B. (2010). Internal gravity waves generated by convective plumes. *Journal of Fluid Mechanics*, 648, pp.405-434.
- Arechavala-Lopez, P., Sanchez-Jerez, P., Bayle-Sempere, J., Uglem, I. and Mladineo, I. (2013). Reared fish, farmed escapees and wild fish stocks—a triangle of pathogen transmission of concern to Mediterranean aquaculture management. *Aquaculture Environment Interactions*, 3(2), pp.153-161.
- Berzosa, C. (2008). *Un año más la playa de Venecia se cierra al baño*. [online] Onda Naranja Cope. Available at: <https://www.ondanaranjacope.com/noticias/id10122-un-ao-ms-la-playa-de-venecia-se-cierra-al-bao.html> [Accessed 14 Feb. 2019].
- Bianchi, C. and Morri, C. (2000). Marine Biodiversity of the Mediterranean Sea: Situation, Problems and Prospects for Future Research. *Marine Pollution Bulletin*, 40(5), pp.367-376.
- Clark, R. (2011). *Marine pollution*. Oxford: Univ. Press.
- Consejería de Obras Públicas, Urbanismo y Transporte (2009). *Plan General de Gandía*. Gandía.
- Dhanak, M. and Xiros, N. (n.d.). *Springer handbook of ocean engineering*.
- EFE, A. (2016). *Reabren una playa de Gandía tras dos días cerrada por mala calidad del agua*. [online] ELMUNDO. Available at: <https://www.elmundo.es/comunidad-valenciana/2016/08/19/57b7178c22601dad628b4575.html>.

- Escrivá, A. (2008). *Las fugas del emisario de la depuradora de Gandía contaminan las playas de Venecia y Rafalcaid. Las Provincias*. [online] Lasprovincias.es. Available at: <https://www.lasprovincias.es/valencia/20080620/safor/fugas-emisario-depuradora-gandia-20080620.html>.
- Feitosa, R., Rosman, P., Carvalho, J., Côrtes, M. and Wasserman, J. (2013). Comparative study of fecal bacterial decay models for the simulation of plumes of submarine sewage outfalls. *Water Science and Technology*, 68(3), pp.622-631.
- Feliu Tena, B. (2016). *Estudio de la efectividad de substratos artificiales como lugares de puesta de sepia y calamar*. Grado en Ciencias Ambientales. Universidad Politécnica de Valencia.
- Felis, N. (2018). *Microplásticos en el sector sur del Golfo de Valencia*. Trabajo de fin de máster, UPV Gandía, pp.10.
- Gadea Pérez, M. (2019). *Determinación de la Influencia de los Factores Ambientales en las Proliferaciones Algas Fitoplanctónicas en la Zona Costera de Gandía*. Doctorado. Universidad Politécnica de Valencia.
- Geyer, W. and Smith, J. (1987). Shear Instability in a Highly Stratified Estuary. *Journal of Physical Oceanography*, 17(10), pp.1668-1679.
- Guidetti, P., Fanelli, G., Frascchetti, S., Terlizzi, A. and Boero, F. (2002). Coastal fish indicate human-induced changes in the Mediterranean littoral. *Marine Environmental Research*, 53(1), pp.77-94.
- Guidetti, P., Terlizzi, A., Frascchetti, S. and Boero, F. (2003). Changes in Mediterranean rocky-reef fish assemblages exposed to sewage pollution. *Marine Ecology Progress Series*, 253, pp.269-278.
- Grace, R. (2007). Outfall Inspections, Token Repairs, and Major Remedial Works. *Marine Technology Society Journal*, 41(2), pp.4-11.
- Hodgkiss, I. and Ho, K. (1997). Are changes in N:P ratios in coastal waters the key to increased red tide blooms? *Asia-Pacific Conference on Science and Management of Coastal Environment*, pp.141-147.

- Las Provincias (2014). *Cientos de peces muertos aparecen en la desembocadura del río Serpis de Gandia - Noticias de Carlet - PORTALDETUCIUDAD*. [online] carlet.portaldetuciudad.com. Available at: https://carlet.portaldetuciudad.com/es-es/noticias/cientos-de-peces-muertos-aparecen-en-la-desembocadura-del-rio-serpis-de-gandia-carlet-006_1_3_489327_92.html.
- Marasović, I., Gačić, M., Kovačević, V., Krstulović, N., Kušpilić, G., Pucher-Petković, T., Odžak, N. and Šolić, M. (1991). Development of the red tide in the Kaštela Bay (Adriatic Sea). *Marine Chemistry*, 32(2-4), pp.375-387.
- Mora, X. (2008). Les equacions de Navier-Stokes. Un repte al determinisme newtonià*. *Butlletí de la Societat Catalana de Matemàtiques*, Vol. 23, num. 1, 2008. Pàg. 53–120. DOI: 10.2436/20.2002.01.12
- Mora, X. (2017). Navier-Stokes equations: Unpredictability even without butterflies?. *Mètode Revistade difusió de la investigació*, 0(8). doi: 10.7203/metode.8.9415
- Ott, M.W. (2005). The accuracy of acoustic vertical velocity measurements: instrument biases and the effect of Zooplankton migration. *Continental Shelf Research* 25, 243–257
- Pastorok, R. and Bilyard, G. (1985). Effects of sewage pollution on coral-reef communities. *Marine Ecology Progress Series*, 21, pp.175-189.
- Pearson, E. and De Fraja Frangipane, E. (1975). *Marine pollution and marine waste disposal*. Oxford [i pozostale]: Pergamon Press, pp.139-146.
- Peres, J. and Picard, J. (1975). Causes de la raréfaction et de la disparition des herbiers de *Posidonia oceanica* sur les côtes françaises de la Méditerranée. *Aquatic Botany*, 1, pp.133-139.
- Prtr-es.es. (2019). *Información pública - Informe detallado EDAR GANDIA - LA SAFOR SUD | PRTR España*. [online] Available at: http://www.prtr-es.es/Informes/FichaComplejo.aspx?Id_Complejo=6110 [Accessed 12 Feb. 2019].
- Rawn, A., Bowerman, F., Brooks, N. (1961). Diffusers for disposal of sewage in sea water. *Trans. ASCE* 126: Part III, 344-88
- Sharp, D., Shawcross, A. and Greated, C. (2014). LIF Measurement of the Diluting Effect of Surface Waves on Turbulent Buoyant Plumes. *Journal of Flow Control, Measurement & Visualization*, 02(03), pp.77-93.

Silvis, Maurits. (2015). Osborne Reynolds: On the phenomenon of turbulence. *Periodiek*.

Soltan, D., Verlaque, M., François Boudouresque, C. and Francour, P. (2001). Changes in Macroalgal Communities in the Vicinity of a Mediterranean Sewage Outfall After the Setting Up of a Treatment Plant. *Marine Pollution Bulletin*, 42(1), pp.59-70.

Swartz, R., Schults, D., Ditsworth, G., DeBen, W. and Cole, F. (n.d.). Sediment Toxicity, Contamination, and Macrobenthic Communities Near a Large Sewage Outfall. *Validation and Predictability of Laboratory Methods for Assessing the Fate and Effects of Contaminants in Aquatic Ecosystems*, pp.152-152-24.

Wilkinson, D. (1991). Model Scaling Laws for Tunneled Ocean-Sewage Outfalls. *Journal of Hydraulic Engineering*, 117(5), pp.547-561.