

MEMORIA

INDICE

1. OBJETO DEL ESTUDIO
2. PROBLEMÁTICA GENERAL Y ESTUDIOS ANTERIORES
3. OBRAS PREVISTAS EN EL ANTEPROYECTO DE LAS ACTUACIONES DE PROTECCIÓN
4. METODOLOGÍA
5. DATOS DE PARTIDA
 - 5.1. Geometría de cauce, márgenes y elementos singulares
 - 5.2. Caudales de diseño
6. ESTABLECIMIENTO DE LAS CONDICIONES DE CONTORNO
 - 6.1. Consideraciones previas
 - 6.2. Análisis de las mareas en el puerto de Bilbao
 - 6.3. Consideraciones sobre el cambio climático
 - 6.4. Condición de contorno propuesta
7. ANÁLISIS DE LA INFLUENCIA DE LA APERTURA DEL CANAL Y DE SU ANCHURA EN LOS NIVELES DE INUNDACIÓN
 - 7.1. Planteamiento de las simulaciones
 - 7.2. Resultados de las simulaciones
 - 7.3. Análisis de los resultados
8. ANÁLISIS DE LA SITUACIÓN DE APERTURA DEL CANAL DE DEUSTO PREVIA A LA EJECUCIÓN DE LOS TÚNELES
9. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

1. OBJETO DEL ESTUDIO

El presente estudio tiene por finalidad analizar la problemática específica de inundaciones de la zona de la península de Zorrozaurre en la ría del Nervión, dentro del contexto de la problemática general de la cuenca, para determinar, por un lado, los niveles alcanzables por el agua durante avenidas extraordinarias, a efectos de establecer las cotas seguras de urbanización, y, por otro, las características geométricas básicas de la obra de apertura del canal de Deusto, que es una de las actuaciones básicas contempladas para resolver el desbordamiento del Nervión a su paso por el núcleo urbano de Bilbao.

2. PROBLEMÁTICA GENERAL Y ESTUDIOS ANTERIORES

La ría del Nervión, o tramo final del cauce del río del mismo nombre donde se hace sentir el efecto de las mareas, comienza propiamente a la altura del barrio de La Peña, donde se incorporan las escorrentías de un área drenante de 1.013 km² correspondiente a las cuencas de los ríos Nervión e Ibaizabal.

La zona de captación o intercuenca propia de la ría del Nervión es de aproximadamente 30 km², muy reducida si se compara con la cuenca ya mencionada de los ríos Nervión e Ibaizabal. Sin embargo, también deben tenerse en cuenta las cuencas de los ríos Cadagua, con 604 km², Asua, con 76 km², Galindo, con 56 km² y Gobelás-Udondo, con 41 km².

Por tanto, la superficie total de cuenca que drena la ría del Nervión es de 1.797 km²

Las inundaciones de 1983 pusieron de manifiesto la notoria insuficiencia del cauce de la ría del Nervión prácticamente desde La Peña hasta algo antes de la confluencia con el Cadagua, si bien esta insuficiencia se iba acentuando hacia aguas arriba, y era especialmente grave a partir del puente del Ayuntamiento.

Las características de estas inundaciones de 1983, que excedieron por supuesto el ámbito de la cuenca del Nervión, así como el comportamiento hidráulico de la ría, han sido objeto de numerosos estudios, entre los que cabe citar:

- *Informe sobre el nivel alcanzado por las aguas en la riada de Agosto de 1983.* Puerto Autónomo de Bilbao, octubre de 1983.
- *Comportamiento hidráulico de la ría de Bilbao ante avenidas.* Puerto Autónomo de Bilbao, marzo de 1984.
- *Estudio básico de la avenida de Agosto de 1983 y de los puntos negros de las cuencas afectadas en el País Vasco.* Ministerio de Obras Públicas y Urbanismo, Dirección General de Obras Hidráulicas, Comisaría de Aguas del Norte de España. Julio de 1984.
- *Estudio hidráulico de mejoras en la capacidad de la ría de Bilbao.* Puerto Autónomo de Bilbao, noviembre de 1984.
- *Plan Integral de Prevención de Inundaciones de la Comunidad Autónoma del País Vasco.* Departamento de Transportes y Obras Públicas del Gobierno Vasco, mayo de 1992.

- *Proyecto constructivo de regeneración del tramo superior de la ría de Bilbao*, incluido en el *Proyecto Integral de regeneración medioambiental de la ría de Bilbao*. Autoridad Portuaria de Bilbao, junio de 1999.
- *Plan Territorial Sectorial de Ordenación de Márgenes de los Ríos y Arroyos de la Comunidad Autónoma del País Vasco*. Departamento de Ordenación del Territorio, Vivienda y Medio Ambiente del Gobierno Vasco, abril de 2000.
- *Estudio hidráulico de la ría del Nervión*. Departamento de Medio Ambiente y Acción Territorial de la Diputación Foral de Bizkaia, marzo de 2001.
- *Anteproyecto de las actuaciones de protección contra Inundaciones en la Ría de Bilbao*. Departamento de Medio Ambiente de la Diputación Foral de Bizkaia, diciembre de 2005.

De los estudios citados cabe resaltar, como referencias más directas, el *Plan Integral de Prevención de Inundaciones de la Comunidad Autónoma del País Vasco*, donde se anticipaba como propuesta de actuación la construcción de un cauce auxiliar en túnel entre la curva de La Peña y Olabeaga, el *Estudio hidráulico de la ría del Nervión*, que predimensionaba y detallaba las actuaciones cuya ejecución conjunta evitaría el desbordamiento de la ría en el término municipal de Bilbao, y el *Anteproyecto de las actuaciones de protección contra inundaciones en la ría de Bilbao*, donde se profundizaba fundamentalmente en el estudio y desarrollo de la actuación correspondiente a los túneles de derivación de caudales entre La Peña y Olabeaga.

3. OBRAS PREVISTAS EN EL ANTEPROYECTO DE LAS ACTUACIONES DE PROTECCIÓN

Por su interés para la comprensión de los apartados siguientes, a continuación se describen las principales actuaciones previstas en el *Anteproyecto de las actuaciones de protección*:

▪ **Nuevo cauce auxiliar de avenidas en túnel desde La Peña a Olabeaga:**

Constituía la obra básica, que por sí sola solucionaría casi totalmente el problema en el Casco Viejo, donde el cauce de la ría presenta una notable falta de capacidad.

El trazado propuesto para este cauce auxiliar, de 3,8 kilómetros de longitud, se definió intentando compatibilizar los objetivos hidráulicos perseguidos con la minimización de los costes económicos propios de este tipo de obras, al tiempo que se evitaba la afección a las edificaciones existentes, aprovechando el suelo disponible tanto en la zona de arranque en La Peña como en la de la descarga en Olabeaga.

La apertura del cauce auxiliar comprendería las siguientes obras:

- ***Obra de toma y desvío:***

Situada a la altura del barrio de La Peña, consistiría en un aliviadero lateral hacia los túneles de desvío, junto con una modificación del cauce existente para crear una sección de control que limite el paso de caudales de avenida hacia el Casco Viejo. En concreto, de los 2.510 m³/s que constituyen el caudal de avenida de periodo de retorno 500 años se derivarían por los túneles 1.320 m³/s, dejando discurrir por el cauce actual 1.190 m³/s.

- ***Túneles***, que consistirían en dos ***galerías*** circulares de 12,20 m de diámetro interior.

- ***Obra de descarga:***

La misión de esta obra sería disipar el exceso de energía con que el agua sale de los túneles, y efectuar su entrega a la ría en condiciones de velocidad similares a las existentes en el cauce.

La obra constaría de dos canales, uno por cada túnel, con anchura y profundidad adecuadas para que se produzca el resalto hidráulico necesario para pasar del régimen rápido de los túneles al lento de la ría y disipar el exceso de energía.

El anteproyecto prevé dotar a estos canales de compuertas tipo esclusa en el frente hacia la ría, así como de una estación de bombeo para su vaciado.

▪ **Apertura del canal de Deusto:**

Esta actuación responde a la necesidad de aumentar la capacidad de desagüe del tramo de cauce actual de la ría entre Olabeaga y la confluencia con el Cadagua, aguas abajo de la cual la capacidad ya es suficiente.

La presencia del canal de Deusto, que discurre en paralelo al cauce actual en casi toda la longitud en la que este último requiere ser ampliado, permite aumentar la capacidad de desagüe total con una actuación localizada y de presupuesto no muy elevado. Esta actuación consistiría en abrir el tramo final del canal hasta conectar de nuevo con el cauce de la ría aguas arriba de la descarga de los túneles, y permitiría resolver la insuficiencia del cauce existente.

4. METODOLOGÍA

La determinación de los niveles de agua alcanzados por las avenidas de diseño requiere una simulación del funcionamiento hidráulico de la ría que tenga en cuenta la geometría del cauce y de las riberas inundables, los parámetros de rugosidad hidráulica característicos de las superficies mojadas y una serie de condiciones de contorno, que pueden consistir en los niveles en determinados puntos o en los caudales circulantes por determinados tramos.

Para realizar las simulaciones precisas se han empleado dos modelos matemáticos diferentes:

- Para la modelización de la parte de la ría comprendida entre el puente de Deusto y la confluencia con el río Cadagua se empleó un **modelo bidimensional de detalle** desarrollado expresamente para este estudio. El programa utilizado fue el MIKE 21, del Danish Hydraulic Institute, en su versión 2005.
- Para la obtención de las condiciones de contorno a imponer en el modelo bidimensional se empleó el **modelo unidimensional de toda la ría** desarrollado en su momento para el *Anteproyecto de las actuaciones de protección contra inundaciones en la ría de Bilbao*. El programa utilizado fue el HEC-RAS del US Army Corps of Engineers, en su versión 3.1.3 de mayo de 2005.

Ambos modelos se calibraron a partir de los datos de niveles y caudales registrados durante la avenida de agosto de 1983 y recogidos en numerosos estudios. Durante el proceso de calibración se obtuvieron los coeficientes de rugosidad de Manning y espesores de lecho móvil que permitían un mejor ajuste de los datos calculados a los realmente medidos.

En el *Anejo nº 1: Descripción de los modelos hidráulicos empleados* se incluye una descripción más detallada de ambos modelos.

5. DATOS DE PARTIDA

En los siguientes puntos se especifica la procedencia de los datos utilizados en las distintas simulaciones.

5.1. Geometría de cauce, márgenes y elementos singulares

La geometría del cauce y las márgenes se ha obtenido de la cartografía a escala 1:1.000 de la Diputación Foral de Bizkaia y de la batimetría de la Autoridad Portuaria de Bilbao, trasladada para referirla al nivel medio del mar en Alicante.

La geometría de puentes y obstáculos se ha obtenido de otros estudios anteriores ya citados, fundamentalmente del *Anteproyecto de las actuaciones de protección contra inundaciones en la ría de Bilbao* y del *Plan Integral de Prevención de Inundaciones de la Comunidad Autónoma del País Vasco*.

5.2. Caudales de diseño

En lo que a caudales de diseño se refiere, conviene precisar aquí que los estudios anteriores no son unánimes a la hora de determinar el caudal de diseño que debe utilizarse para dimensionar las obras de protección, aunque en muchos de ellos se haya adoptado un periodo de retorno de 500 años, que es el que se considera adecuado para este tipo de actuaciones.

Así, por ejemplo, para un periodo de retorno de 500 años, en el *Plan Integral de Prevención de Inundaciones* (1992) el caudal pico del hidrograma a la altura del barrio de La Peña se estimó en 2.642 m³/s, mientras que en el *Proyecto constructivo de regeneración del tramo superior de la ría de Bilbao* (1999) se adoptó, para la misma probabilidad, un valor de 2.000 m³/s.

Para el *Anteproyecto de las actuaciones de protección contra inundaciones en la ría de Bilbao* se realizó un estudio hidrológico en el que se actualizaron los valores obtenidos en el *Plan Integral de Prevención de Inundaciones*, revisando la definición del régimen pluviométrico y de las características hidrológicas de la cuenca. De dicho estudio hidrológico, que se incluye aquí como anejo nº 2, se deduce que el caudal pico para el periodo de retorno de 500 años en el inicio de la ría de Bilbao, a la altura del barrio de La Peña, es de 2.510 m³/s, en vez de los 2.642 m³/s contemplados en el PIPI.

Por lo tanto, los caudales que se utilizarán como avenida de diseño en el presente estudio son:

Punto	Caudal (m ³ /s)
La Peña	2.510,00
Incorporación de caudales del Cadagua y del Asua	4.060,90
Incorporación de caudales del Galindo y del Udondo	4.119,20

6. ESTABLECIMIENTO DE LAS CONDICIONES DE CONTORNO

6.1. Consideraciones previas

Como se ha explicado en el apartado anterior, en este estudio se adopta como nivel de inundación de diseño el asociado a un período de retorno de 500 años, esto es, aquel cuya probabilidad de superación en un año no excede del 0,2%.

En el caso de los cauces de río, donde los niveles de inundación dependen sólo del caudal de avenida, para obtener el nivel de inundación de diseño basta con determinar el nivel correspondiente al caudal pico e hidrograma de la avenida de 500 años.

Sin embargo, en las zonas de ría los niveles de inundación dependen no sólo de los caudales circulantes, sino también de la altura de la marea. Por tanto, en estos tramos es preciso analizar el efecto conjunto de las avenidas y las mareas, con el fin de obtener unos niveles de inundación cuya probabilidad de excedencia no se separe significativamente de la ya citada de 0,2% (T=500 años).

En el caso de la modelización de la apertura del canal de Deusto, la condición de contorno a utilizar se ha determinado mediante el siguiente procedimiento:

En primer lugar, se ha obtenido el nivel del mar en el Abra para el periodo de retorno deseado. Como se explica a continuación, este nivel dependerá de la marea, pero también de la evolución futura del nivel medio del mar como consecuencia del cambio climático.

En segundo lugar, este nivel del mar en el Abra se ha utilizado como condición de contorno para el modelo unidimensional HEC-RAS. Simulando el comportamiento del conjunto de la ría, se ha obtenido la altura de lámina que se produciría en la confluencia del Cadagua si concurren ese nivel de marea en la desembocadura y el caudal de diseño deseado.

Por último, la altura de lámina en la confluencia del Cadagua se ha utilizado como una de las condiciones de contorno del modelo bidimensional.

En los puntos siguientes se analizan las condiciones de marea y cambio climático a considerar en la modelización.

6.2. Análisis de las mareas en el puerto de Bilbao

La marea puede desglosarse como la suma de dos componentes, la marea astronómica y la componente meteorológica (residuo o marea meteorológica, como se la conoce vulgarmente).

En lo que se refiere a la marea astronómica, el puerto de Bilbao, como todos los puertos del Atlántico, presenta mareas de tipo semidiurno, es decir, con dos pleamares y dos bajamares diarias, claramente diferenciadas y con amplitud apreciable.

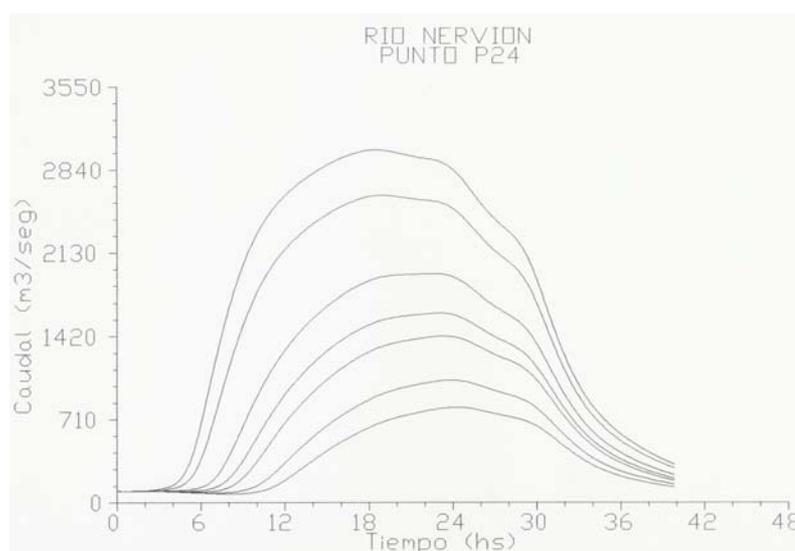
Por su parte, la marea meteorológica incluye todas las variaciones de nivel no periódicas, como las ocasionadas por variaciones de densidad, por variaciones de la presión atmosférica o por el viento.

Mientras que la marea astronómica, por su periodicidad, permite una caracterización determinista de los valores máximos, la caracterización extremal de la componente de residuo o meteorológica necesita un tratamiento probabilista en términos de período de retorno.

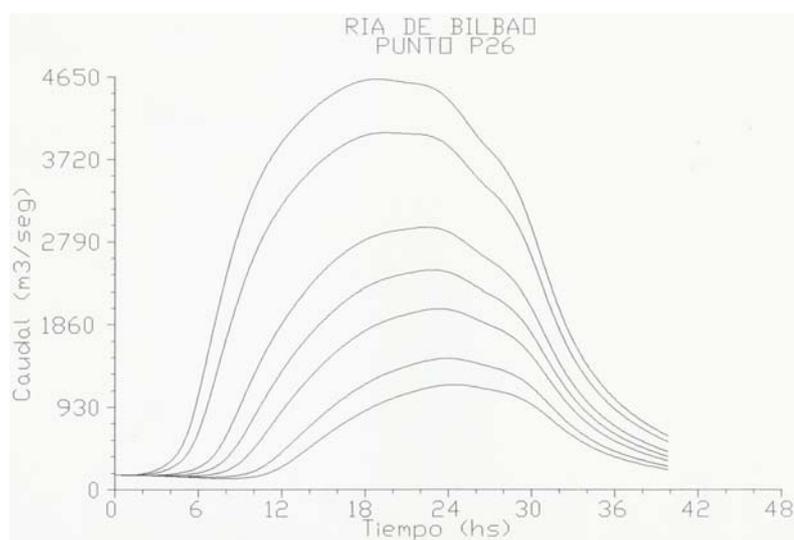
6.2.1. Análisis de la marea astronómica

A la hora de determinar el valor de diseño de la marea astronómica, es preciso analizar dos aspectos: por una parte, la probabilidad de coincidencia del caudal punta de la avenida con la pleamar; y, por otra parte, el valor de dicha pleamar.

En lo que se refiere a la **probabilidad de coincidencia de la pleamar con el paso del caudal punta**, se ha partido de los hidrogramas obtenidos en el estudio hidrológico del *Plan Integral de Prevención de Inundaciones de la Comunidad Autónoma del País Vasco*. A continuación aparecen los hidrogramas correspondientes a los puntos de integración nº 24 y nº 26, situados respectivamente antes y después de la confluencia del Nervión y el Cadagua:



*Hidrograma antes de la incorporación de caudales del río Cadagua
(periodos de retorno de 1.000, 500, 100, 50, 25, 10 y 5 años)*



*Hidrograma después de la incorporación de caudales del río Cadagua
(periodos de retorno de 1.000, 500, 100, 50, 25, 10 y 5 años)*

A la vista de ambos hidrogramas, y puesto que las mareas en el puerto de Bilbao son semidiurnas (una pleamar cada doce horas), se puede concluir que la punta de la avenida se extiende a lo largo de un periodo de tiempo lo suficientemente largo como para garantizar la coincidencia del caudal máximo con la pleamar.

En cuanto a la **altura de la pleamar**, se ha partido de los datos recogidos para el puerto de Bilbao en el informe *Red de mareógrafos de puertos (Redmar). Resumen de parámetros relacionados con el nivel del mar y la marea que afectan a las condiciones de diseño y explotación portuaria*, redactado en febrero de 2005 por la Dirección de Planificación y Desarrollo Portuario de Puertos del Estado.

En dicho informe, y a partir de la simulación de un ciclo nodal de 18,6 años, se obtienen los siguientes niveles de marea astronómica (la diferencia entre el cero del puerto y el nivel medio del Mediterráneo en Alicante es de 2,016 m):

	Valores referidos al cero del puerto (m)			Valores referidos al nivel medio del Mediterráneo en Alicante (m)		
	Máxima	Mínima	Media	Máxima	Mínima	Media
Pleamar	4,83	2,76	3,76	2,81	0,74	1,74
Bajamar	2,04	-0,11	0,99	0,02	-2,13	-1,03
Pleamar viva	4,83	3,8	4,32	2,81	1,78	2,30

	Valores referidos al cero del puerto (m)			Valores referidos al nivel medio del Mediterráneo en Alicante (m)		
	Máxima	Mínima	Media	Máxima	Mínima	Media
Bajamar viva	0,97	-0,11	0,44	-1,05	-2,13	-1,58
Pleamar muerta	3,52	2,76	3,16	1,50	0,74	1,14
Bajamar muerta	2,04	1,09	1,59	0,02	-0,93	-0,43

De la tabla anterior se desprende que, para el puerto de Bilbao, las pleamares astronómicas pueden variar entre un máximo de 2,81 metros y un mínimo de 0,74 metros, con un valor medio de 1,74 metros referidos al nivel medio del Mediterráneo en Alicante.

6.2.2. Análisis de la marea meteorológica

Para el análisis de la marea meteorológica se ha partido del informe *Red de mareógrafos de puertos (Redmar). Resumen de parámetros relacionados con el nivel del mar y la marea que afectan a las condiciones de diseño y explotación portuaria*, ya mencionado, donde a las series de niveles totales medidos en el mareógrafo de Santurce se les ha restado la componente de marea astronómica para obtener una serie de residuos.

De acuerdo con dicho informe, los valores extremos de la serie de residuos pueden ajustarse a una distribución de Weibull:

$$Xr = \beta \cdot \left[-\ln \left(\frac{1}{\lambda \cdot Pr} \right) \right]^{\frac{1}{\gamma}} + \alpha$$

donde, para el caso de Bilbao, los parámetros adoptan los siguientes valores:

α	8,9
β	12,2
γ	1,5
λ	24,8

De este modo, se obtienen los siguientes residuos máximos para cada periodo de retorno:

Periodo de retorno (años)	Marea meteorológica (m)
2	0,39
5	0,44
10	0,47
20	0,50
25	0,51
50	0,54
100	0,57
300	0,61
500	0,63
600	0,64

6.2.3. Valor de marea propuesto para el diseño

En el presente estudio se ha adoptado, como criterio conservador, el de hacer coincidir el paso del caudal de avenida correspondiente al período de retorno de 500 años con:

- La pleamar astronómica media, y
- La marea meteorológica cuya probabilidad de excedencia en un año sea del 50%.

Con este criterio se obtiene la siguiente condición de contorno en el Abra:

Pleamar astronómica media (m sobre NMMA)	1,74
Marea meteorológica para T = 2 años (m)	0,39
Nivel total en el Abra (m sobre NMMA)	2,13

En estudios anteriores se había tomado como cota de marea la de +1,773 metros sobre el NMMA, que fue la de la pleamar coincidente con la avenida de agosto de 1983 según el estudio *Comportamiento hidráulico de la ría de Bilbao ante avenidas*, redactado por el Puerto Autónomo de Bilbao en marzo de 1984.

6.3. Consideraciones sobre el cambio climático

Debido al horizonte temporal en el que debe plantearse una actuación urbanística como la de Zorrozaurre, es preciso tomar en consideración el efecto que puede tener el cambio climático sobre el nivel del mar en el futuro.

A este respecto, la Organización de las Naciones Unidas ha hecho pública recientemente una parte del contenido del *Cuarto Informe de Evaluación del Grupo Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático (IPCC)*, que se encuentra en fase de redacción. En concreto, en el *Resumen para responsables de políticas* aprobado en la 10ª Sesión del Grupo de Trabajo I (París, febrero de 2007) se establecen las siguientes proyecciones de la elevación media del nivel del mar a escala mundial a finales del siglo XXI:

Escenario	Elevación del nivel del mar (diferencia en metros del nivel en 2090-2099 respecto al nivel de 1980-1999)
B1	0,18 – 0,38
A1T	0,20 – 0,45
B2	0,20 – 0,43
A1B	0,21 – 0,48
A2	0,23 – 0,51
A1FI	0,26 – 0,59

Los escenarios son los establecidos en el *Informe especial sobre escenarios de emisiones (IE-EE)* aprobado en marzo de 2000, que se detallan en el anejo nº 3. Estos escenarios no incluyen iniciativas adicionales en relación con el clima, es decir, en ninguno de ellos se da por supuesto que se cumplan ni la Convención Marco de las Naciones Unidas sobre el cambio climático ni los objetivos de emisiones establecidos en el Protocolo de Kyoto.

6.4. Condición de contorno propuesta

6.4.1. Nivel en el Abra

Para tener en cuenta el efecto del cambio climático, en el presente estudio se ha optado por sumarle a la condición de contorno establecida en el apartado anterior una sobre elevación del nivel medio del mar igual al promedio de todos los escenarios, que es de 0,34 metros.

Por lo tanto, la condición de contorno final sería:

Nivel en el Abra (marea astronómica + marea meteorológica) (m sobre NMMA)	2,13
Elevación del nivel medio del mar (m)	0,34
Nivel total en el Abra (m sobre NMMA)	2,47

6.4.2. Nivel en la desembocadura del Cadagua

Una vez determinada la cota de lámina en el Abra, la condición de contorno para el modelo Mike 21 (es decir, la cota de lámina en la ría, aguas arriba de la confluencia con el Cadagua) se ha obtenido mediante un modelo HEC-RAS que simula el comportamiento del tramo final de la ría, desde el Abra hasta justo aguas arriba del puente de Deusto.

Las características de esta simulación con HEC-RAS son:

	Fichero	Título
Modelo	nervion13.prj	nervion13
Plan	nervion13.p71	P0744_fondo_móvil_2,6m+varios_Q_y_mareas
Geometría	nervion13.g21	P0744_fondo_móvil_2,6m
Caudales	nervion13.f41	P0744_Qvarios+varias_mareas

6.4.2.1. Datos de partida de la simulación

6.4.2.1.1. Geometría

La modelización realizada para trasladar la condición de contorno comprende una longitud de 10.866 metros de la ría del Nervión, desde el puente de Deusto en Bilbao hasta el muelle de Churruga en Las Arenas.

En total, el modelo cuenta con 47 secciones transversales, con anchuras suficientes para incluir no sólo el cauce principal sino también la llanura de inundación.

Aunque los P.K. aumentan en el sentido de avance del río, la numeración de las secciones va de aguas abajo hacia aguas arriba, ya que así lo requiere el programa. De esta forma, los extremos del tramo de estudio son los siguientes (para facilitar las consultas, se han conservado los puntos kilométricos y números de sección del *Anteproyecto de las actuaciones de protección contra inundaciones en la ría de Bilbao*):

Sección	P.K.	Descripción
46.3	4+634´39	Cara de aguas arriba del puente de Deusto
2	15+500,00	Desembocadura

Como elementos singulares, en esta simulación intervienen únicamente los puentes de Deusto y Euskalduna, ya que los puentes de Róntegui y Vizcaya no tienen ninguna influencia sobre el flujo.

6.4.2.1.2. Caudales de diseño

Los caudales de diseño son los mencionados en el punto 5.2:

Punto	Caudal (m ³ /s)
La Peña	2.510,00
Incorporación de caudales del Cadagua y del Asua	4.060,90
Incorporación de caudales del Galindo y del Udondo	4.119,20

6.4.2.1.3. Otras hipótesis de la modelización

- Los coeficientes de rugosidad de Manning obtenidos durante la calibración son:

Sección inicial		Sección final		n cauce	n márgenes
2	Abra	32	depósito grúa	0,020	0,050
33		34		0,032	0,050
35		36		0,022	0,050
37		40		0,038	0,050

Sección inicial		Sección final		n cauce	n márgenes
41		41		0,060	0,050
42		42		0,055	0,050
43		43		0,030	0,050
43.2	aguas abajo puente de Euskalduna	43.2	aguas abajo puente de Euskalduna	0,010	0,050
43.3	aguas arriba puente de Euskalduna	43.3	aguas arriba puente de Euskalduna	0,012	0,050
44		45		0,015	0,050
46.2	aguas abajo puente de Deusto	46.2	aguas abajo puente de Deusto	0,012	0,050
46.3	aguas arriba puente de Deusto	46.3	aguas arriba puente de Deusto	0,018	0,050

- Entre las secciones 2 y 30 se ha considerado un fondo móvil de 2,6 metros.

6.4.2.2. Resultados de la simulación

El modelo HEC-RAS proporciona como resultado una serie de cotas de lámina, de las cuales se ha tomado la de la sección 29 como condición de contorno de aguas abajo en todas las sucesivas simulaciones bidimensionales:

Nivel total en el Abra (m sobre NMMA)	2,47
Cota de lámina en la sección 29 (m sobre NMMA)	3,51

7. ANÁLISIS DE LA INFLUENCIA DE LA APERTURA DEL CANAL Y DE SU ANCHURA EN LOS NIVELES DE INUNDACIÓN

7.1. Planteamiento de las simulaciones

Para analizar la influencia de las distintas alternativas de apertura del canal de Deusto sobre los niveles de inundación, se han realizado las siguientes **simulaciones**:

- Sin apertura del canal
- Con apertura del canal de ancho 50 metros.
- Con apertura del canal de ancho 60 metros.
- Con apertura del canal de ancho 70 metros.
- Con apertura del canal de ancho 75 metros.
- Con apertura del canal de ancho 80 metros.
- Con apertura del canal de ancho 100 metros.

Estas distintas geometrías, que se definen en los planos del *Anejo nº 4: Simulación de las alternativas de apertura del canal de Deusto*, comparten las siguientes **características de la apertura**:

- La apertura del canal afecta únicamente a su zona inicial, en una longitud de 565,13 metros, mientras que el resto del canal permanecería en su estado actual.
- La rasante adoptada es uniforme, con una pendiente de 0,000885 m/m, que varía desde la cota -5,00 m en su arranque, en la zona de Euskalduna, hasta la -5,50 m en el punto de enlace con el canal existente.
- La nueva margen derecha sigue la alineación propuesta por la Comisión Gestora de Zorrozaurre, respetando la rotonda de Euskalduna, mientras que los incrementos de anchura se han conseguido retranqueando la nueva margen izquierda.
- La sección tipo adoptada tiene cajeros verticales hasta una cota cinco metros por encima de la del fondo, mientras que a partir de esa cota desciende con taludes 3H:1V hasta la cota de rasante. A efectos de su representación en el modelo, esta sección tipo se ha sustituido por una sección rectangular equivalente.

Por otra parte, todas estas simulaciones comparten una serie de **hipótesis comunes**:

- El caudal de diseño es el caudal punta de la avenida de 500 años, esto es, 2.510 m³/s.

- Se suponen en servicio los túneles de desvío descritos en el apartado 3, de modo que 1.320 m³/s se derivan por los túneles entre La Peña y Olabeaga y 1.190 m³/s continúan circulando por el cauce a lo largo del Casco Viejo.
- Según se ha explicado en el punto 6.4, la condición de contorno aguas abajo es una cota de lámina de 3,51 metros, correspondiente a un nivel del mar en el Abra 2,47 metros sobre el NMMA.
- La isla de Zorrozaurre ha sido rellenada por completo hasta una cota muy superior a la de la inundación (en el apartado 8 se define cuál debe ser esta cota, en función de las actuaciones que se contemplen y los objetivos de inundabilidad planteados).

Cada uno de los casos anteriores, así como la situación actual, ha sido objeto de **dos simulaciones**:

- a) Una simulación inicial con el modelo bidimensional, que proporciona resultados de detalle en toda la zona comprendida entre el puente de Deusto y la confluencia con el Cadagua.
- b) Una simulación posterior con el modelo unidimensional, que toma como condición de contorno la cota de lámina obtenida con el modelo bidimensional para la sección del puente de Deusto, y que proporciona las alturas de lámina que se producirán en la zona del Casco Viejo.

7.2. Resultados de las simulaciones

En el *Anejo nº 4: Simulación de las alternativas de apertura del canal de Deusto* se recogen dos tipos de resultados para cada alternativa:

- a) Resultados del modelo bidimensional: para cada caso se incluyen las características de la simulación, las alturas de lámina en la zona de estudio, el reparto de caudales entre los brazos y la mancha de inundación.
- b) Resultados del modelo unidimensional: se presenta una única tabla con las alturas de lámina en el Casco Viejo para cada caso.

7.3. Análisis de los resultados

A la vista de los resultados, se observa que:

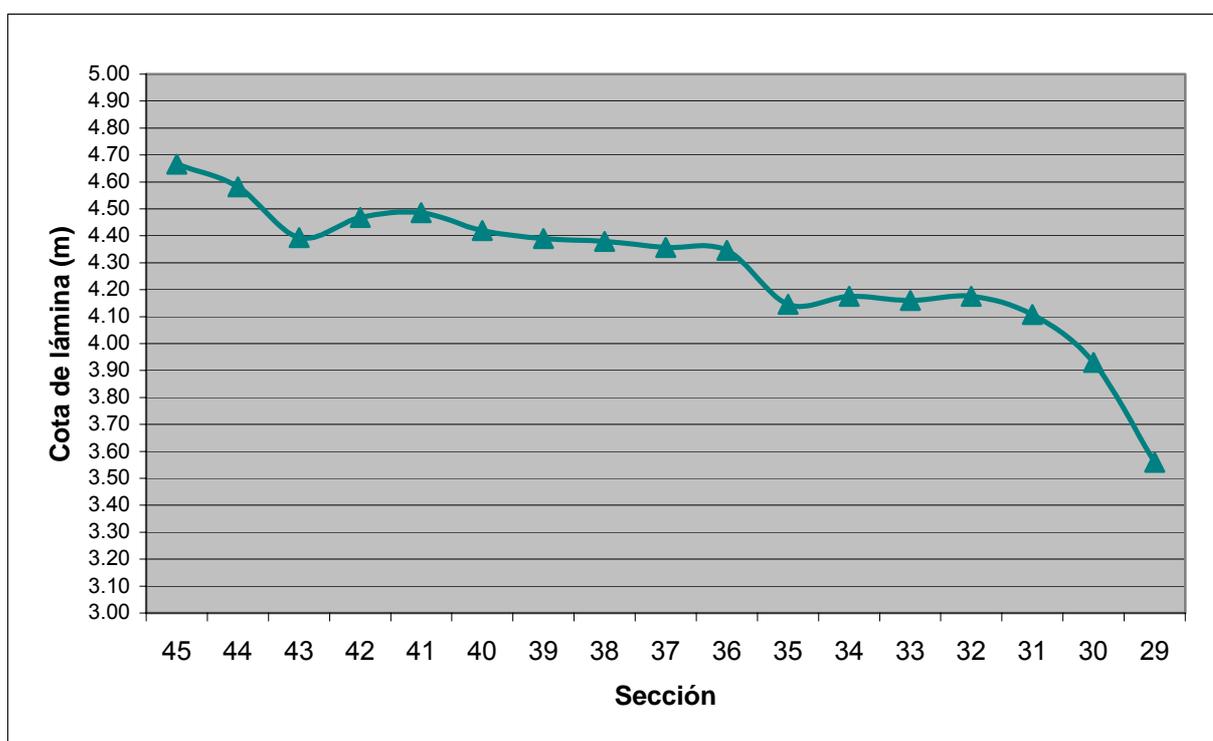
- La apertura del canal con sólo 50 metros de anchura supone ya una reducción significativa de la altura de lámina respecto a la situación sin apertura. Esta diferencia, que es de 1,07 metros

en la sección 45, aguas abajo del puente de Deusto, llega a ser de hasta 0,70 metros en el Casco Viejo (sección 74.3 del modelo unidimensional, correspondiente a la cara de aguas arriba del puente de San Antón).

- Al aumentar la anchura del canal se van obteniendo reducciones de nivel adicionales pero cada vez de menor entidad, hasta el punto de que **para aperturas superiores a los 75 metros no se producen ya mejoras apreciables**. Por otra parte, para las alternativas con mayor anchura de canal comienza a producirse un flujo inverso por el cauce de la ría, de modo que parte del caudal descargado por los túneles en Olabeaga se dirige hacia la apertura del canal, sin que este exceso de capacidad de desagüe en el canal suponga ventaja de tipo alguno.

A este respecto, hay que indicar que los resultados obtenidos son coherentes con los estudios anteriores, en particular con el *Anteproyecto de las actuaciones de protección contra inundaciones en la ría de Bilbao*, donde se había previsto dimensionar la apertura del canal para el caudal de $1.190 \text{ m}^3/\text{s}$, que es el que discurre por el cauce bajo el puente de Deusto. En efecto, en la simulación con Mike 21 la apertura de 75 metros funciona correctamente con ese caudal de $1.190 \text{ m}^3/\text{s}$, mientras que, de ampliarse esta anchura, se produce el flujo inverso ya mencionado.

Por otra parte, de la simulación de detalle realizada con el modelo Mike 21 para una apertura de canal de 75 metros de anchura, el caudal de 500 años y un nivel de mar en el Abra de 2,47 metros se obtiene el siguiente gráfico de niveles de agua:



A la vista del gráfico anterior se observa que para la futura isla de Zorrozaurre, que se sitúa entre las secciones 41 y 31, cabe distinguir dos subzonas:

- En la subzona A, entre las secciones 41 y 36, la altura de lámina varía entre 4,49 m y 4,35 metros sobre el NMMA.
- En la subzona B, entre las secciones 35 y 31, la altura de lámina varía entre 4,18 m y 4,11 metros sobre el NMMA.

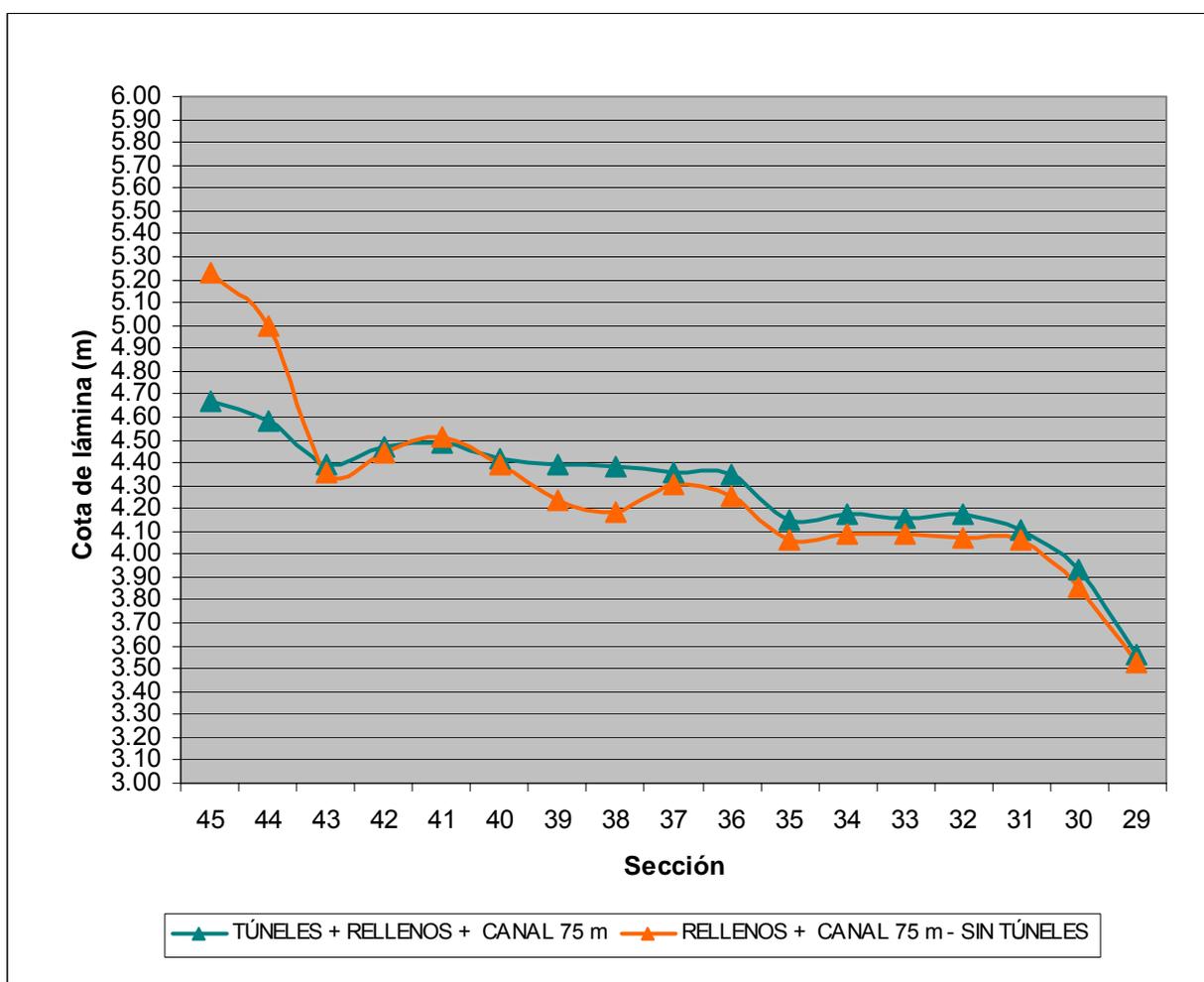
Sobre estos niveles de la avenida de 500 años es preciso establecer un resguardo para tener en cuenta la altura de velocidad ($v^2/2g$) y otras incertidumbres, que se evalúan en torno a los 50 centímetros. Por esta razón, las **cotas de urbanización** que se proponen son:

Subzona	Cota sobre NMMA
Subzona A (41 – 36)	+5,00 m
Subzona B (36 – 31)	+4,70 m

Finalmente, y para analizar la influencia de las **variaciones de la anchura del canal existente** aguas abajo de la zona de apertura que pudieran plantearse durante el desarrollo del plan urbanístico, se ha realizado una simulación adicional en la que se supone que todo el canal, incluyendo la apertura, tiene una sección tipo constante de 75 metros de anchura. Los resultados de esta simulación, que se presentan en el *Anejo nº 5: Simulación del funcionamiento de un canal de anchura constante*, muestran que la capacidad de desagüe se mantiene prácticamente idéntica y que no hay influencia en las cotas de inundación aguas arriba, razón por la que, desde el punto de vista hidráulico, no existen objeciones a dichos posibles cambios en la anchura, siempre que se mantenga como mínimo una sección hidráulica equivalente a la de la apertura de canal recomendada.

8. ANÁLISIS DE LA SITUACIÓN DE APERTURA DEL CANAL DE DEUSTO PREVIA A LA EJECUCIÓN DE LOS TÚNELES

Para evaluar esta situación se ha efectuado una simulación en la que la totalidad del caudal de la avenida de 500 años circula por el cauce de la ría aguas arriba del puente de Deusto. Los resultados completos de esta simulación se recogen en el *Anejo nº 6: Simulación de la situación previa a la apertura de los túneles de desvío*, mientras que en el gráfico siguiente se comparan las alturas de lámina alcanzadas para una apertura de canal de 75 metros, antes y después de la entrada en funcionamiento de los túneles de desvío:



Como puede observarse, la apertura del canal resuelve por sí sola el problema de inundaciones de Zorrozaurre, dado que a partir de la sección 41, correspondiente al inicio de la apertura del canal, los niveles de aguas alcanzados son similares a los que se registrarían si los túneles estuvieran operativos.

Por tanto, la ejecución de los túneles resulta fundamental para resolver la problemática de inundaciones de Bilbao aguas arriba del puente de Deusto, que se debe a una insuficiencia de cauce, pero el

funcionamiento hidráulico aguas abajo del punto de apertura del canal no se ve influido por el hecho de que todo el caudal de avenida llegue por el cauce actual en vez de repartido entre éste y los túneles.

9. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

A la vista de los resultados anteriores se concluye, por tanto, que la sección óptima para la apertura del canal es la de 75 metros de anchura, y que la cota segura de urbanización a efectos de inundaciones es la +5,00 m sobre el NMMA para la zona de Zorrozaurre entre las secciones 41 y 36 y la +4,70 m entre las secciones 35 y 31.

Asimismo, se ha comprobado que la ejecución de los túneles de desvío, aunque es imprescindible para resolver la problemática de inundaciones del casco urbano de Bilbao aguas arriba del puente de Deusto, no incrementa la eficacia de la solución propuesta para la zona de Zorrozaurre, donde los rellenos y la apertura del canal son suficientes para evitar las inundaciones.

Bilbao, mayo de 2007.

Fdo: Alberto Galdos Tobalina

Ingeniero de Caminos, Canales y Puertos