



Ayuntamiento
de Málaga



Gerencia Municipal de Urbanismo
Obras e Infraestructuras



PLAN ESPECIAL DEL RÍO GUADALMEDINA PE-4

DOCUMENTO 8.6. SEPARATA HIDRÁULICA

ESTADO ACTUAL

FECHA: SEPTIEMBRE DE 2020

REVISIÓN: 01



Ayuntamiento
de Málaga



Gerencia Municipal de Urbanismo
Obras e Infraestructuras



PLAN ESPECIAL DEL RÍO GUADALMEDINA PE-4
DOCUMENTO 8.6. SEPARATA HIDRÁULICA
ESTADO ACTUAL
MEMORIA

FECHA: SEPTIEMBRE DE 2020

REVISIÓN: 01

ÍNDICE

1. AGENTES	2
2. INFORMACIÓN PREVIA	3
2.1. OBJETO DEL PRESENTE INFORME TÉCNICO	3
2.2. EMPLAZAMIENTO	3
2.3. ENTORNO FÍSICO	3
2.4. NORMATIVA DE APLICACIÓN	3
3. ANTECEDENTES	5
3.1. ANTECEDENTES HISTÓRICOS	5
3.2. ANTECEDENTES DE ESTUDIOS HIDRÁULICOS	6
3.2.1. Estudios del CEDEX.....	7
3.2.2. Planes Directores de Saneamiento y Drenaje	10
4. DESCRIPCIÓN DEL ESTADO ACTUAL DEL CAUCE	11
4.1. ARROYOS TRIBUTARIOS	12
4.2. PUENTES	13
4.3. GEOMETRÍA Y VEGETACIÓN	13
4.3.1. Presa del Limonero-Puente Armiñán	15
4.3.2. Puente de Armiñán. P.K. 3+645.00.....	29
4.3.3. Aguas abajo del puente de la Aurora. P.K. 4+201.00- 4+300.00	33
4.3.4. Aguas abajo del puente de la Esperanza. P.K. 4+639.00	36
4.3.5. Desembocadura – Puente del Carmen P.K. 5+050.00 – P.K. 5+300.00.....	41
5. ESTUDIO HIDRÁULICO DEL ENCAUZAMIENTO ACTUAL	44
5.1. DESCRIPCIÓN Y DEFINICIÓN DEL MODELO HIDRÁULICO BIDIMENSIONAL IBER	44
5.2. CONTORNO DE SIMULACIÓN	45
5.3. MODELO DEL TERRENO.....	46
5.4. RUGOSIDADES.....	46
5.5. CARACTERÍSTICAS DEL FLUJO.....	48
5.6. ESTRUCTURAS	48
5.7. CONDICIONES DE CONTORNO.....	49
5.8. PARAMETROS DE LA SIMULACIÓN	50
5.8.1. Parámetros generales	50
5.8.2. Parámetros de la malla.....	50
5.8.3. Parámetros de tiempo	51
5.9. RESULTADOS DE LAS SIMULACIONES	52



Ayuntamiento
de Málaga



1. **AGENTES**

Promotor.

Gerencia Municipal de Urbanismo, Obras e Infraestructuras del Ayuntamiento de Málaga.

Equipo redactor.

UTE FERNÁNDEZ MAKERS, S.L.P.- MAIA Consultoría de Medio Ambiente, Ingeniería y Arquitectura, S.L.P.



2. INFORMACIÓN PREVIA

2.1. OBJETO DEL PRESENTE INFORME TÉCNICO

El presente documento se redacta con la finalidad de analizar en situación actual del comportamiento del río Guadalmedina durante eventos extremos debidos a inundaciones con diferentes períodos de retorno.

2.2. EMPLAZAMIENTO

Este informe abarca todo el tramo del río Guadalmedina entre el pie de la presa del Limonero y su desembocadura al mar Mediterráneo, con una longitud aproximada de 6 km.

2.3. ENTORNO FÍSICO

El tramo de río estudiado presenta un estado natural muy modificado. Se trata de un tramo regulado por la presencia de la presa del Limonero aguas arriba que, además, recibe los aportes de agua y sedimentos de los arroyos tributarios situados aguas abajo de la presa.

La condición urbana de este tramo de río ha provocado que la presión urbanística a lo largo de su historia redujese la superficie del álveo original.

Los numerosos desbordamientos acaecidos en los últimos siglos motivaron el levantamiento sucesivo de los muros de ribera lo que, unido al efecto de laminación de las presas del Agujero y el Limonero y la reforestación parcial de la cuenca del Guadalmedina, ha reducido el riesgo de avenidas en caso de lluvias torrenciales.

Las propuestas contenidas en este informe se realizan en base a la previsión de un mantenimiento óptimo de las trampas de acarreo situadas en los cauces de los arroyos tributarios aguas abajo de la presa del Limonero.

2.4. NORMATIVA DE APLICACIÓN

- Real Decreto 849/1986, de 11 de abril, por el que se aprueba el Reglamento del Dominio Público Hidráulico.
- Real Decreto 9/2008, de 11 de enero, por el que se modifica el Reglamento del Dominio Público Hidráulico.
- Real Decreto 638/2016, de 9 de diciembre, por el que se modifica el Reglamento del Dominio Público Hidráulico aprobado por el Real Decreto 849/1986, de 11 de abril, el Reglamento de Planificación Hidrológica, aprobado por el Real Decreto 907/2007, de 6 de julio, y otros reglamentos en materia de gestión de riesgos de inundación, caudales ecológicos, reservas hidrológicas y vertidos de aguas residuales.



- Directiva 2000/60/CE del Parlamento Europeo y del Consejo de 23 de octubre de 2000 por la que se establece un marco comunitario de actuación en el ámbito de la política de aguas.
- Directiva 2007/60/CE del Parlamento Europeo y del Consejo, de 23 de octubre de 2007, relativa a la evaluación y gestión de los riesgos de inundación.
- Real Decreto Legislativo 1/2001, de 20 de julio, por el que se aprueba el texto refundido de la Ley de Aguas.
- Ley 9/2010, de 30 de julio, de Aguas de Andalucía.
- Ley 7/2007, de 9 de julio, de Gestión Integrada de la Calidad Ambiental.
- Plan Hidrológico de las Cuencas Mediterráneas 2015-2021.
- Orden FOM/298/2016, de 15 de febrero, por la que se aprueba la norma 5.2 - IC drenaje superficial de carreteras.

3. ANTECEDENTES

3.1. ANTECEDENTES HISTÓRICOS

Debido a las inundaciones históricas que ha sufrido el Río Guadalmedina, se han ido construyendo en el río infraestructuras que ayudaran a evitar dichos episodios. En 1907 se produjo una gran riada en Málaga que produjo grandes daños materiales y personales, por lo que en 1908 se construyó la Presa del Agujero, una presa de laminación para reducir los caudales máximos circulantes, situada a 7.5 km de la desembocadura actual en el Mar Mediterráneo.

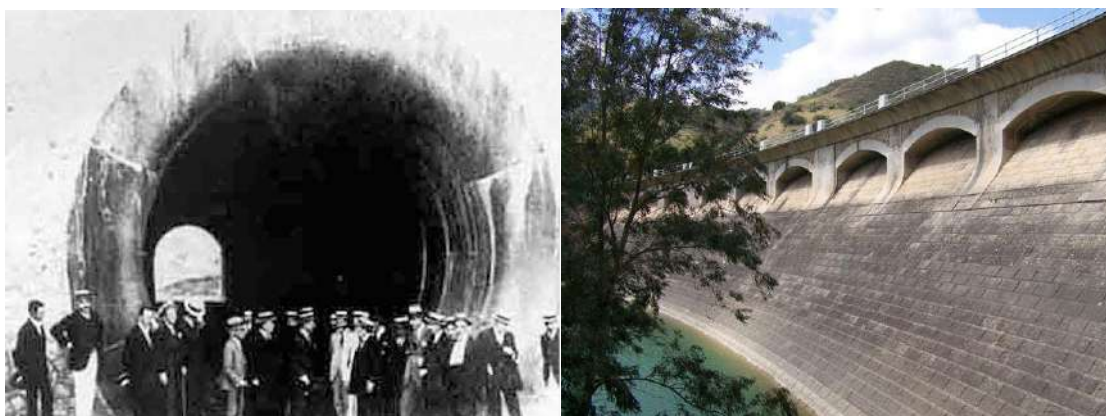


Imagen 1: Inauguración y estado actual de la Presa del Agujero

A pesar de esta presa, seguía habiendo riesgo de inundaciones, por lo que en 1983 se terminó la construcción de la Presa del Limonero, 2 kilómetros aguas abajo de la Presa del Agujero (que se inutilizó), de mucha mayor altura, y que dota a Málaga de mayor seguridad contra inundaciones.



Imagen 2: Situación de la Presa del Agujero y del Limonero con respecto a la ciudad de Málaga

A esta infraestructura se le sumó años después la remodelación y el encauzamiento actual del tramo urbano del río, desde el viaducto de la Autovía del Mediterráneo hasta la desembocadura.



Imagen 3: Ortofoto con ubicación de la Presa del Limonero y la ciudad de Málaga

3.2. ANTECEDENTES DE ESTUDIOS HIDRÁULICOS

El proyecto inicial del encauzamiento sufrió varias modificaciones desde su primer diseño hasta su construcción, a causa de varios factores.

El proyecto original fue enviado al CEDEX (Centro de Estudio y Experimentación de obras públicas) para su análisis hidráulico y constatar si la capacidad hidráulica de desagüe era la adecuada y si las trampas de acarreo estaban bien dimensionadas. En función de los resultados (CEDEX, 1992), el proyecto se modificó, especialmente en lo referente a las dimensiones de la trampa de acarreo entre el puente de Armiñan y Puente de la Aurora, ampliándola.

Posteriormente se producirían más cambios en el proyecto original hasta su construcción definitiva, como es la eliminación de unos estanques previstos aguas abajo del puente de la Aurora o algunos puentes proyectados que cambiaron su configuración. Cambios que nada tuvieron que ver con razones de comportamiento hidráulico del encauzamiento.



3.2.1. Estudios del CEDEX

Entre los últimos años de los años 80 y principios de los 90, se produjeron una serie de ensayos con modelos físicos del río Guadalmedina a escala reducida, de los cuales se emitieron 5 informes técnicos:

- a. Estudio en modelo reducido del encauzamiento del río Guadalmedina. Avance de trabajo. Junio de 1989. Clave CEDEX 41-430-1-017
- b. Estudio en modelo reducido del encauzamiento del río Guadalmedina. Informe parcial 11º 1. Octubre de 1989. Clave CEDEX 41-430-1-017.
- c. Estudio en modelo reducido del encauzamiento del río Guadalmedina. Informe final. Abril de 1990. Clave CEDEX 41-430-1-017.
- d. Estudio en modelo reducido del encauzamiento del río Guadalmedina II. Tramo entre los puentes de Armiñán y Tetuán. Informe final. Enero de 1992. Clave CEDEX 41-491-1-026.
- e. Estudio en modelo reducido del encauzamiento del río Guadalmedina II. Tramo de aguas arriba del puente de Armiñán. Informe final. Febrero de 1992. Clave CEDEX 41-491-1-026.

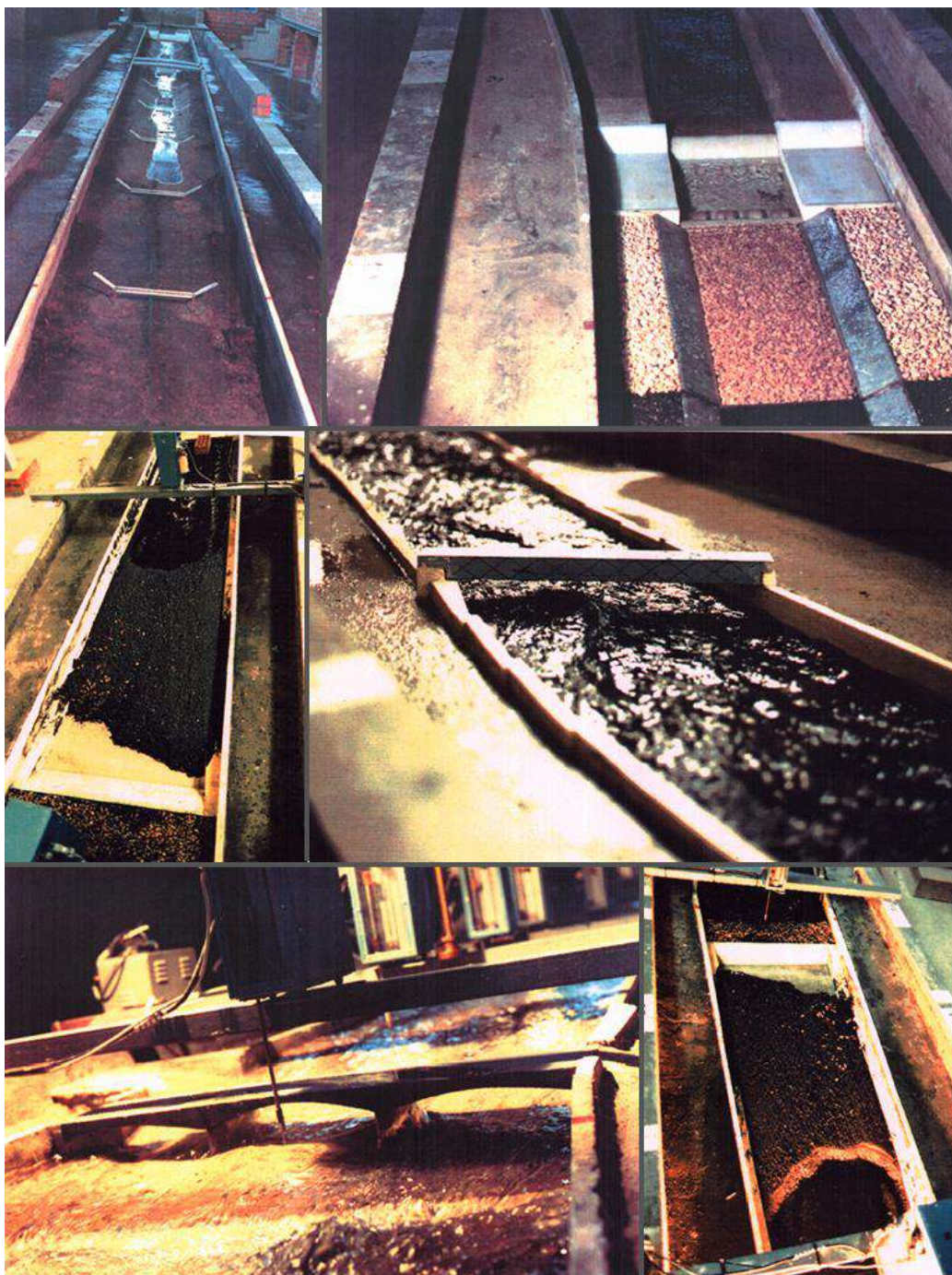


Imagen 4: Modelo físico reducido del río Guadalmedina. Fuente: CEDEX

Estos estudios abarcan los últimos 3.000 metros del río, de los aproximadamente 6.000 que hay desde la presa hasta el mar. Concretamente desde la cadena más próxima al Puente de la Rosaleda, hasta la desembocadura.

Los datos hidrológicos, en particular el caudal de diseño de $600 \text{ m}^3/\text{s}$, se obtuvo de la Confederación Hidrográfica del Guadalquivir. Se estimaron $400 \text{ m}^3/\text{s}$ por las aportaciones de la

Presa del Limonero, según sus normas de explotación para un período de retorno de 1.000 años, más las aportaciones de los arroyos aguas debajo de la presa, estimadas en 200 m³/s.

La parte del estudio hidrológico que se refiere a los arroyos aguas debajo de la presa no se ha encontrado. Las normas de explotación y sus cálculos de vertidos sí están disponibles. En un principio puede parecer ilógico usar un período de retorno de 1.000 años para el cálculo de una avenida que se solicita por normativa de 500 años, pero este dato global de 600 m³/s se ha considerado desde un principio como el adecuado y es el que se usará siempre para la simulación hidráulica, ya que forma parte del Pliego de Prescripciones Técnicas para la Contratación del Servicio de Asistencia Técnica para la Redacción del Plan Especial del Río Guadalmedina-PE-4 por Procedimiento Restringido. Hasta la fecha no ha habido nuevos estudios hidrológicos validados que puedan poner en duda esta cifra.

En el transcurso de las simulaciones se observaron diferentes problemáticas del comportamiento hidráulico, como puestas en carga de algunos puentes, o posibles socavaciones de estribos. Algunas de ellas se solucionaron en proyecto durante el período de simulación, por lo que se pudo cambiar el modelo físico y comprobar su idoneidad. Otras no fue posible volverlas a ensayar y se supone que el proyectista introduciría las modificaciones pertinentes en función de las recomendaciones.

En cualquier caso, las conclusiones fueron que el río tenía capacidad suficiente para transportar los 600m³/s.

En el año 2010 se encargó un nuevo estudio al CEDEX, *Modelación numérica de la capacidad hidráulica actual del encauzamiento del tramo urbano del río Guadalmedina*.

En este caso el estudio es mediante métodos numéricos y no con modelos a escala, para comprobar la capacidad hidráulica del río. Este posterior estudio fue debido a posibles diferencias entre el proyecto original y el ejecutado posteriormente, como ya se ha comentado.

En este estudio se inspeccionó visualmente el río y se consideró que el tramo del río aguas abajo del puente de Armiñan no había cambiado sustancialmente entre el proyecto original que se ensayó y el construido, por lo que se dan por válidos los estudios realizados hasta la fecha. Por lo tanto, se estudió solamente el tramo de río que va desde la presa hasta el Puente de Armiñan.

Los resultados de este estudio numérico fueron satisfactorios, y el tramo del río estudiado con su configuración actual, tiene suficiente capacidad hidráulica para transportar los 600 m³/s. Es por ello

que el dato numérico para la capacidad hidráulica del río se estableció en Pliego de Bases de 600 m³/s.

3.2.2. Planes Directores de Saneamiento y Drenaje

Recientemente, en el contexto de redacción de *los Planes Directores de Saneamiento y Drenaje de las márgenes del río Guadalmedina, Málaga*, se realizó, entre otras, una simulación de la capacidad hidráulica del tramo encauzado del río, desde la presa hasta la desembocadura. En este caso se usaron métodos numéricos, sirviéndose para ello del software de simulación hidrológica e hidráulica Infoworks ICM.

Para tener una mejor definición de la geometría del río, se realizó un levantamiento topográfico detallado del encauzamiento, que también ha sido utilizado para la simulación hidráulica del presente estudio.



Imagen 5: Extracto de la nube de puntos utilizada para zona del cauce del estado actual. Fuente: EMASA

En este estudio llevado a cabo por Urbaconsult S.A. y A-C ingenieros realizado en febrero de 2016, ya se observan las deficiencias de capacidad de drenaje del estado actual del río para los 600 m³/s. Se producen desbordamientos entre el puente de Armiñan y de la Aurora, y en la desembocadura del río.



Imagen 6: Extracto de Planes Directores de Saneamiento y Drenaje de las márgenes del río Guadalmedina. Fuente: EMASA

Entre los estudios que se realizaron, se hicieron estudios hidrológicos de los hidrogramas de los arroyos vertientes al tramo encauzado del Guadalmedina. Estos modelos, sin embargo, no se han podido calibrar aún, por lo que sus resultados no son aplicables al hidrograma resultante en el propio río, de manera que los 600 m³/s originales siguen siendo los usados en las simulaciones.

4. DESCRIPCIÓN DEL ESTADO ACTUAL DEL CAUCE

El cauce urbano del río Guadalmedina tiene una longitud aproximada de seis kilómetros y un desnivel total de 40 metros, medidos entre la presa del Limonero y su desembocadura, tiene una orientación noroeste-sureste en su primer kilómetro y norte-sur hasta el final de su recorrido.

El carácter actual del tramo de estudio está marcado por una geometría lineal, de aspecto duro, determinado por la presencia de las numerosas infraestructuras hidráulicas destinadas a canalizar el desagüe de la presa, que sin embargo han obviado la componente ambiental o paisajística del río.

Dentro del tramo urbano existen distintos elementos que configuran la imagen del río, los cuáles se pasan a describir a continuación.

4.1. ARROYOS TRIBUTARIOS

Al río, aparte de las aguas provenientes de la presa, llegan las aguas de 12 arroyos en diferentes puntos, la mayoría de ellos encauzados bajo la ciudad, excepto los dos primeros, el arroyo Pastelero y el Pescadores.

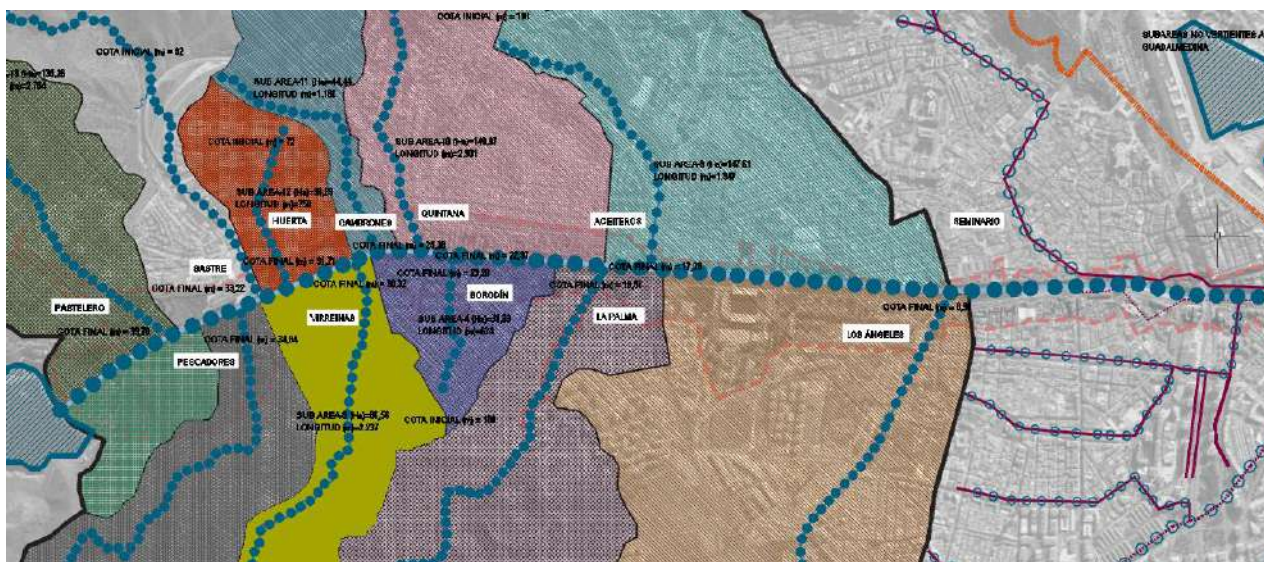


Imagen 7: Extracto de plano 9.1.1. Arroyos tributarios

Margen	Arroyo	Superficie (Ha)	Pk vertido
Derecha	Pescadores	275.57	0+668
	Virreinas	80.56	1+120
	Borodín	31.69	1+591
	La Palma	19.51	2+220
	Los Ángeles	466.89	3+628
Izquierda	Pastelero	602.1	0+382
	Sastre	135.26	0+768
	Huerta	36.93	0+900
	Cambrones	44.44	1+280
	Quintana	149.97	1+469
	Aceiteros	147.61	2+461

Tabla 1: Localización de arroyos tributarios

Los de la presa y de los arroyos mencionados, son los principales aportes al río en su tramo urbano. También se encuentran diferentes aportes, que se denominan como *vertidos*, provenientes de drenajes urbanos a lo largo del río o alivios de la red de saneamiento, de pequeña entidad, cuyos caudales se consideran despreciables en los cálculos hidráulicos de inundabilidad del río.

4.2. PUENTES

La necesidad de conectar ambas orillas ha ido generando la aparición de puentes y pasarelas a lo largo del río, observándose una mayor densidad de conexiones a medida que el río se acerca a la ciudad histórica.

Puente	Anchura tablero, perpendicular al puente(m)	Canto (m)	Pilares			Ángulo respecto río (sentido agujas reloj)	P.K.
			Filas	Pilares por fila	Anchura (m)		
Autovía A7	32	2	2	4	1/2.5	65°	0+339.83
Salida 241 A7	11.3	1	2	2	1	84°	0+508.00
Jardín Botánico	14.2	1.2	2	2	1	90°	0+711.00
Conservatorio	6	1.75	2	2	1	88°	1+144.60
Concepción	5	1.2	2	2	1	90°	1+566.60
Palmilla	8	1.4	5	1	0.9/1.8/2.6	94°	2+120.00
Mediterráneo	25	1.6	2	2	1/1.2	90°	2+447.00
Rosaleda Norte	9	0.8/2.2	2	3	1	90°	2+948.00
Rosaleda Sur	9	0.8/2.2	2	3	1	90°	2+977.50
Armiñan	12.8	1/2.7	2	1	1.27	94°	3+645.50
Aurora	11.8	1.5	0	0	0	91°	4+201.00
Trinidad	4	0.25	0	0	0	57°	4+356.00
Alemanes	4.25	0.25	0	0	0	111°	4+471.65
Esperanza	18	0.5	2	3	0.6	88°	4+639.00
Tetuán	46.5	1.2	1	8	1.2	79°	4+752.00
Misericordia	5.65	1/1.4	2	2	0.6	90°	4+871.60
Perchel	4	1/2.6	0	0	0	90°	5+000.00
Del Carmen	15.6	2.55	2	1	1/1.6/3	90°	5+300.00
Antonio Machado	33	1	2	2	1.5	40°	5+371.00
Ferrocarril del Puerto (Puente de Hierro)	11.35	1 + estructura	0	0	0	57°	5+431.00
Pescaderías	11.85	1	2	1	1.5	76°	5+509.00

Tabla 2: Localización de puentes

4.3. GEOMETRÍA Y VEGETACIÓN

La anchura del cauce es variable durante todo el río, siendo los cambios graduales. A modo de resumen, podemos dividir el río en varios tramos:

- **Presa del Limonero - Puente de Armiñan.** Durante la primera mitad del río, la anchura varía entre 65 y 50 metros aproximadamente.



- **Puente de Armiñan- Puente de la Aurora.** En este tramo, la anchura se reduce gradualmente de 50 a 40 metros.
- **Puente de la Aurora – Puente de la Esperanza.** Unos pocos metros más abajo del puente de la Aurora, el cauce se estrecha hasta en torno a 35 metros de ancho, su parte más estrecha de todo el tramo urbano, hasta llegar al puente de la esperanza.
- **Puente de la Esperanza – Puente del Perchel.** En este tramo el río vuelve a ensancharse hasta unos 40 metros de ancho, y se mantiene en estas dimensiones hasta llegar al puente del Perchel.
- **Puente del Perchel – Final del cauce.** En este tramo, la anchura varía gradualmente desde los 40 metros de ancho hasta los 70 metros del final del cauce.

A continuación, se describe el estado actual del río, apoyándose en imágenes de satélite Landsat y Copérnico obtenidas a través de Google Earth, y fotografías realizadas a fecha de 1 de octubre de 2019.

En el plano 9.1.5 Estado Actual Reportaje Fotografico se puede encontrar el reportaje fotográfico completo del estado actual del río, del cual se usan algunas fotografías para la descripción de esta memoria.

Conviene recordar que cuando se habla de margen izquierda y derecha del río siempre se hace mirando aguas abajo del río, en la dirección de su flujo, por lo que en las imágenes de satélite, la margen que aparece en su parte izquierda es la margen derecha del río, y la que aparece en su parte derecha, la margen izquierda.

El río se divide en diferentes tramos para su mejor descripción y entendimiento.

4.3.1. Presa del Limonero-Puente Armiñán

4.3.1.1. Salida de la Presa. P.K. 0+000.00



Imagen 8: Presa del Limonero. Fuente: Google Earth

La parte urbana del Río Guadalmedina empieza en la presa. En ella se pueden distinguir dos salidas de agua:

- Una más pequeña que corresponde al desagüe de fondo de la presa (bajo la edificación), con un caudal máximo de $100 \text{ m}^3/\text{s}$ si se abren las dos compuertas existentes y la presa se encuentra en el nivel de explotación máximo.
- Un aliviadero de emergencia (el canal de hormigón que sale de la parte alta). Para el período de retorno de 1.000 años el caudal desaguado se calcula en $400 \text{ m}^3/\text{s}$ y tiene una capacidad máxima de $600 \text{ m}^3/\text{s}$. Hasta la fecha el agua nunca ha llegado hasta el aliviadero de emergencia.

4.3.1.2. Puente de la autovía. P.K. 0+000.00 – P.K.-0+339.00

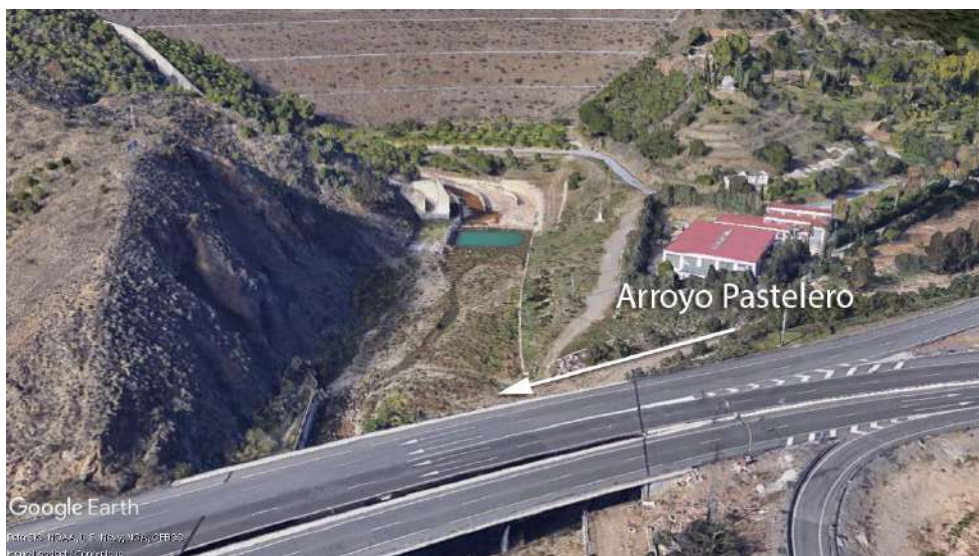


Imagen 9: Desembocadura de arroyo Pastelero en río Guadalmedina. Fuente: Google Earth

En la salida de la presa existen unas estructuras de hormigón para dirigir los caudales en dirección al cauce del río y evitar así posibles daños en los laterales del cauce.

En el lateral izquierdo existe un muro de protección y justo antes de llegar al puente de la autovía A7 desemboca en el cauce el arroyo Pastelero.



Imagen 10: Aliviadero de la presa a la izquierda y desembocadura del arroyo Pastelero a la derecha

El cauce es de tierra con vegetación dispersa anual, herbácea, de bajo porte y arbustiva.

A partir de este tramo, existirán muros laterales que encauzarán el río y solo se verán interrumpidos por la desembocadura de los arroyos.

4.3.1.3. Puente de la Autovía A7 – Puente de la salida 241 A7. P.K.-0+339.00 – 0+508.00



Imagen 11: Puentes de la Autovía y Salida 241. Fuente: Google Earth

Aguas abajo del puente de la A7 está el primer resalto artificial del río, conocidos como rápidas. Estas rápidas persiguen disminuir la pendiente del río por tramos, en las que queden atrapados los acarreos que aportan los arroyos y los desagües de fondo de la presa.

A partir de ese punto, la sección de río cambia. Aparecen dos plataformas laterales hechas de hormigón con una parte central cubierta de tierra. La vegetación en este punto se hace más densa, apareciendo vegetación de más alto porte.

En la margen izquierda aparece un vertido al río que no se corresponde a ningún arroyo existente.



Imagen 12: Vertido aguas debajo de la primera rápida. Fuente: Google Earth

En el lateral izquierdo aparece además una berma superior de tierra con escasa o nula vegetación.

4.3.1.4. Desde puente de la salida 241 hasta puente del Jardín Botánico. P.K. 0+508.00-0+711.00



Imagen 13: Puentes de la Autovía, Salida 241 y Jardín Botánico. Fuente: Google Earth

En este tramo aparece la desembocadura del arroyo Pescadores en la margen derecha.



Imagen 14: Desembocadura arroyo Pescadores (a la izquierda en la imagen)

A partir de ese punto, también aparece una berma en dicha margen, quedando la sección tipo como un nivel inferior en la parte inferior de cauce (Cauce en la imagen) con vegetación arbustiva bastante abundante, dos niveles superiores (Nivel 1) de hormigón a ambos lados, con la parte central de tierra y vegetación densa de bajo porte, y dos muros verticales de hormigón que separan dos bermas de tierra con poca vegetación. Esta disposición continuará durante bastantes metros.

Inmediatamente aguas abajo del puente del Jardín Botánico está la desembocadura del arroyo Huertas. A partir de este, todos los arroyos están encauzados bajo la ciudad.



Imagen 15: Desembocadura arroyo Huertas

4.3.1.5. Puente del Jardín Botánico – Puente del conservatorio. P.K. 0+711.00-1+144.00



Imagen 16: Puentes del Jardín Botánico y del Conservatorio. Fuente: Google Earth

La sección tipo y la vegetación continúa igual que en el tramo anteriormente descrito.

En este tramo desemboca el arroyo Sastre, y según la hidrografía proporcionada por el ayuntamiento de Málaga, también el arroyo Huertas, aunque la desembocadura de este último no se ha podido encontrar en la inspección ocular del río.

4.3.1.6. Rápida aguas abajo del puente del conservatorio. P.K. 1+240.00



Imagen 17: Puente del Conservatorio, desembocadura arroyos Virreinas y Cambrones. Fuente: Google Earth

En este punto encontramos la rápida más grande del río. Aguas arriba de la misma encontramos la desembocadura del arroyo de las Virreinas.



Imagen 18: Desembocadura arroyo Virreinas



Imagen 19: Rápida de hormigón

Inmediatamente aguas abajo de la rápida tenemos la desembocadura del arroyo Cambrones.



Imagen 20: Desembocadura arroyo Cambrones

4.3.1.7. Rápida aguas abajo del puente del Conservatorio – Puente de la Concepción. P.K. 1+240.00- P.K.1+566.00



Imagen 21: Puente del Conservatorio, desembocadura de arroyos Quintana y .Borondín Fuente: Google Earth

La sección tipo y vegetación se mantiene similar, con la única diferencia que las bermas se hacen más anchas y aparece un talud de tierra desde la altura de la berma hasta el nivel de la calle. En este tramo desemboca el arroyo Quintana y el arroyo Borodín, y aparecen cadenas de escollera en el fondo del cauce para estabilizar el terreno y evitar arrastres.



Imagen 22: Desembocadura arroyo Quintana oculta tras vegetación



Imagen 23: Desembocadura arroyo Borondín (izquierda en imagen) y pequeño vertido (derecha en imagen)

4.3.1.8. Puente de la Concepción- Puente de la Palmilla. P.K.1+566.00 – P.K.2+120.00



Imagen 24: Puente de la Palmilla. Fuente: Google Earth

La sección se mantiene similar a las anteriores, exceptuando que el talud de la berma desaparece. En la berma de la izquierda aparece una rampa de acceso al cauce. La vegetación también es similar. Al final de este tramo, justo antes del puente de la Palmilla, esta sección tipo desaparece. En todo este tramo existen cadenas de escollera para evitar arrastres, con una separación variable de entre 30 y 37 metros.

4.3.1.9. Puente de la Palmilla - Rápida. P.K.2+120.00- P.K. 2+234.00



Imagen 25: Puente de la Palmilla y desembocadura de arroyo la Palma. Fuente: Google Earth

A partir del puente de la Palmilla, desaparecen los denominados hasta ahora *nivel 1*, y pasamos a tener una sección con un cajón rectangular de cauce con dos bermas horizontales a ambos lados.

La berma derecha en esta zona aparece recubierta de asfalto.

El tipo de vegetación permanece similar.

En esta zona aparece otra rápida, justo en la desembocadura del arroyo de la Palma.



Imagen 26: Desembocadura de arroyo la Palma y rápida de hormigón

4.3.1.10. Rápida – Puente del Mediterráneo. P.K. 2+234.00 – P.K. 2+447.00



Imagen 27: Puente Mediterráneo. Fuente: Google Earth

La berma de la derecha se ensancha gradualmente hasta llegar al puente del Mediterráneo. Aparecen en las bermas rampas que permiten el paso por debajo del puente.

En la margen izquierda aparece la desembocadura del arroyo Aceiteros y un vertido urbano, así como otros dos vertidos más en la margen derecha.



Imagen 28: Desembocadura arroyo Aceiteros



Imagen 29: Vertido en margen izquierda y margen derecha

4.3.1.11. Primer tramo aguas abajo Puente del Mediterráneo. P.K. 2+447.00 – P.K. 2+640.00



Imagen 30: Puente Mediterráneo. Fuente: Google Earth

Inmediatamente aguas abajo del puente del Mediterráneo, en la berma de la izquierda aparece un tramo de carril bici que se introduce en la misma durante 80 metros, y en el caso de la derecha, unas tierras invaden la berma durante 120 metros. La berma derecha sigue estando asfaltada y la izquierda recubierta de tierra compactada con algo de vegetación de pequeño porte y herbáceas en los laterales.

Aparece un vertido urbano en la margen derecha.



Imagen 31: Vertido en margen derecha

4.3.1.12. Segundo tramo aguas abajo del puente del Mediterráneo hasta el puente de la Rosaleda. P.K. 2+640.00- P.K. 2+948.00



Imagen 32: Tableros norte y sur puente de la Rosaleda. Fuente: Google Earth

En este tramo aparece otra rápida en el P.K. 2765. En las bermas aparecen dos rampas para poder cruzar por debajo los dos tableros del puente de la Rosaleda.



Imagen 33: Rápida de hormigón entre puentes Mediterráneo y Rosaleda

4.3.1.13. Primer tramo aguas abajo del puente de la Rosaleda. P.K. 2+948.00-3+100.00



Imagen 34: Puente de la Rosaleda. Fuente: Google Earth

La sección, una vez pasados los dos tableros del puente de la Rosaleda (tablero norte y tablero sur), continúa igual que en los tramos anteriores.

En la margen derecha aparece un vertido urbano.



Imagen 35: Vertido urbano aguas abajo puente de la Rosaleda

4.3.1.14. Segundo tramo aguas abajo del puente de la Rosaleta. P.K. 3+100.00-3+520.00



Imagen 36: Cauce urbano aguas abajo puente de la Rosaleta. Fuente: Google Earth

La sección y tipo de vegetación continúa. En la berma de la derecha se puede ver como se usa la berma, de manera no regulada, como aparcamiento.

4.3.2. Puente de Armiñán. P.K. 3+645.00



Imagen 37: Puente Armiñán y desembocadura de arroyo de los Ángeles. Fuente: Google Earth

Este es uno de los puntos clave de cambio de sección del río. A partir de aquí desaparecen las bermas ya que el cauce se empieza a estrechar.

Aguas arriba de este puente desemboca el arroyo de los Ángeles, el último arroyo en desembocar en el río y el que más caudal se prevé que lleve.



Imagen 38: Desembocadura arroyo de los Ángeles

Aparece la penúltima rápida, que conforma la cabecera de la trampa de acarreo que se menciona en los estudios con modelo a escala que el CEDEX realizó en los años 90. En la margen izquierda de la rápida aparece un nuevo vertido urbano.



Imagen 39: Vertido urbano aguas abajo de puente de Armiñán

4.3.2.1. Trampa de acarreo aguas abajo del puente de Armiñán. P.K. 3+692.00 – P.K. 3+937.00



Imagen 40: Trampa de acarreo aguas abajo de puente de Armiñán. Fuente: Google Earth

En este tramo existen dos rápidas que forman la última trampa de acarreo, que debería evitar que no llegaran acarreo a la parte final del río. Según el estudio del CEDEX, esta debería tener 25.000 m³ de capacidad, 15.000 m³ de capacidad para retener los áridos que se preveían, y 10.000 m³ más de margen. En planta, esta trampa tiene aproximadamente 10.000 m², lo que supondría una profundidad media de 2.5 metros.

Esta trampa debería limpiarse con regularidad, pero se observa que está totalmente colmatada y no se limpia, por lo que no cumplen su función.

Como se observa en su parte inferior existen unos drenajes, ya que, en su estado ideal, limpia de acarreo, acumularía agua que sería necesario drenarla para que no se quedara estancada.



Imagen 41: Rápida entre puentes Armiñán y Aurora

4.3.2.2. Segunda rápida aguas abajo del puente de Armiñán – Puente de la Aurora. P.K. 3+937.00 – P.K. 4+201.00



Imagen 42: Puente de la Aurora. Fuente: Google Earth

En este tramo, la solera debería dejar de estar cubierta de tierra y aparecer el hormigón, aunque, como vemos, en ocasiones, los acarreos cubren el cauce y no se limpian, llegando en muchas ocasiones a cubrir el cauce desde la última rápida hasta casi el puente de la Aurora.

En los laterales de la sección, aparecen unos taludes que hace que la sección no sea completamente cuadrada.

Justo antes del puente de la Aurora, aparecen unos realces del cauce de hormigón que canalizan los caudales bajos hacia la zona central. Esto, sumado a un aumento de la pendiente del cauce, provoca una zona de altas velocidades que mantiene el cauce limpio de acarreos.



Imagen 43: Estructuras de hormigón bajo puente de la Aurora. Fuente: Google Earth

Este punto es el comienzo de una nueva sección tipo y de tramo del cauce urbano del río más céntrico y más problemático, ya que se estrecha mucho.

4.3.3. Aguas abajo del puente de la Aurora. P.K. 4+201.00- 4+300.00



Imagen 44: Puente de la Aurora. Fuente: Google Earth

Aparece en el cauce una solera de hormigón. En el margen izquierdo hay una zona sobreelevada cubierta de césped, y en la derecha, unos estanques con tuberías de agua formando una serie de fuentes. Desde hace años, estas fuentes se encuentran vacías y sin funcionamiento.

Esta sección tipo continuará así hasta el puente de la Esperanza.

En el puente de la Aurora, vemos unas escaleras metálicas de acceso en su margen izquierda, haciendo el cauce accesible peatonalmente desde este punto dirección aguas abajo.



Imagen 45: Acceso a cauce en puente de la Aurora. Fuente: Google Earth

4.3.3.1. Puente de la Aurora hasta puente de la Esperanza. P.K. 4+201.00- 4+639.00



Imagen 46: Puente de la Esperanza. Fuente: Google Earth

A la altura del hotel IBIS, aguas arriba del puente de la Trinidad, aparece un pequeño canal en el margen derecho, que recogerá y conducirá aguas procedentes de bombeos de aguas freáticas de esa margen del río.



Imagen 47: Puentes de Aurora, Trinidad y Alemanes. Fuente: Google Earth

La sección continúa hasta el puente de la Esperanza, pasando por debajo de los puentes de la Trinidad y de los Alemanes, que son pasarelas peatonales sobre el cauce.

Aguas abajo del puente de los alemanes aparece un vertido urbano de reciente creación, alrededor de 2017. A su vez se ha construido un muro a 45° de flujo del agua que obstaculiza el paso del agua y que se desconoce si es temporal, a causa de las obras que se está realizando en las inmediaciones, o permanente.



Imagen 48: Vertido aguas abajo puente de los Alemanes

Justo antes del puente de la Esperanza, en el margen izquierdo, vemos como aparece una rampa de acceso al cauce.

4.3.4. Aguas abajo del puente de la Esperanza. P.K. 4+639.00



Imagen 49: Puente de la Esperanza. Fuente: Google Earth

En este punto se produce un nuevo cambio en la sección. Desaparecen las fuentes del margen derecho y la zona elevada del margen izquierdo. El cauce central pasa de estar recubierto de hormigón a estar recubierto de césped. El canal del margen derecho se ensancha y aparece uno simétrico en el lado izquierdo. Ambos continuarán hasta el mar, bajo el puente del Perchel. Aparece en este tramo, como vemos, una nueva rampa de acceso al río.

4.3.4.1. Puente de Tetuán. P.K. 4+752.00



Imagen 50: Puente de Tetuán. Fuente: Google Earth

Bajo el puente de Tetuán, aún se encuentran parte de las pilas del puente original, que se han conservado por razones históricas.



Imagen 51: Pilas históricas del puente de Tetuán

Los canales laterales se amplían para rodearlos y luego la sección recupera su forma.

4.3.4.2. Puente de Tetuán – Puente de la Misericordia. P.K. 4+752.00 – 4+871.00



Imagen 52: Puentes de Tetuán y de la Misericordia. Fuente: Google Earth

Coincidiendo con el comienzo de la última rampa de acceso al río, en el margen izquierdo, aparecen dos pequeños taludes a cada lado, recubiertos por ladrillo. En su parte superior hay una zona horizontal que sirve para el paso de personas por los márgenes del río. Cada cierta distancia, unas escaleras y unas pasarelas de hormigón por encima de los canales laterales, facilitan el cruce peatonal del cauce.

En el puente de la Misericordia, existen escaleras a ambos lados que permiten el acceso al cauce.

4.3.4.3. Puente de la Misericordia – Mar. P.K. 4+871.00 – P.K. 5+050.00



Imagen 53: Puentes de Misericordia y Perchel. Fuente: Google Earth



La sección continúa igual que la anterior hasta donde llega el mar. En la imagen, debido a unas obras de adecuación del cauce aguas abajo de este punto, ha desaparecido la vegetación de la parte central del cauce, pero en su estado habitual, está cubierto de césped.

El puente de Perchel, debido a problemas estructurales se ha demolido y se está ejecutando uno nuevo con la misma huella que el anterior.

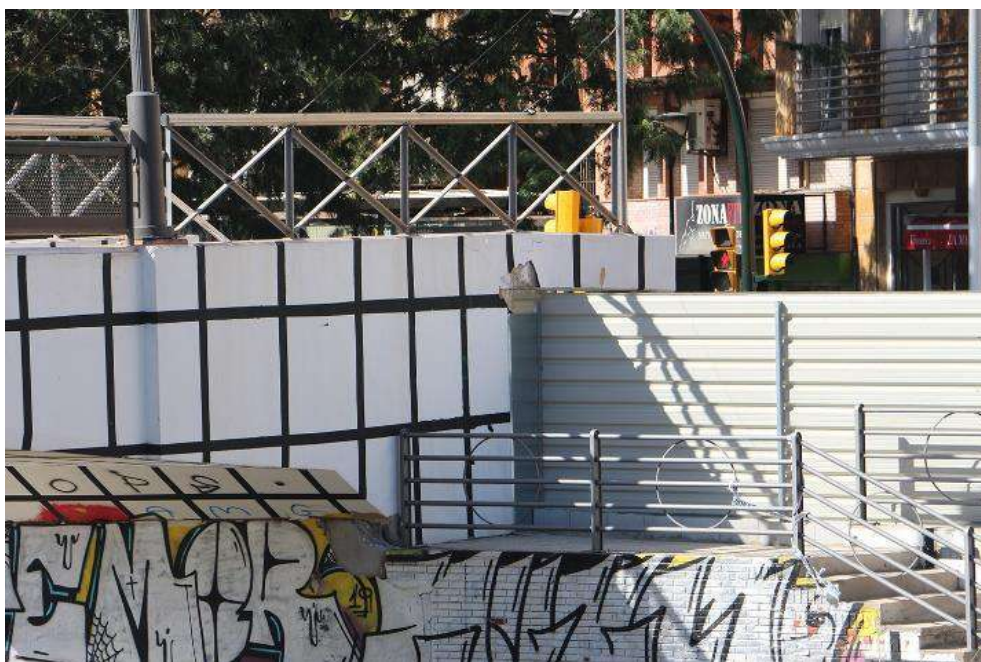




Imagen 54: Obras en puente de Perchel

El agua tampoco llega en la imagen de satélite hasta donde habitualmente llega por dichas obras, pero se ha representado en la imagen su estado habitual, que se puede ver en la siguiente fotografía.

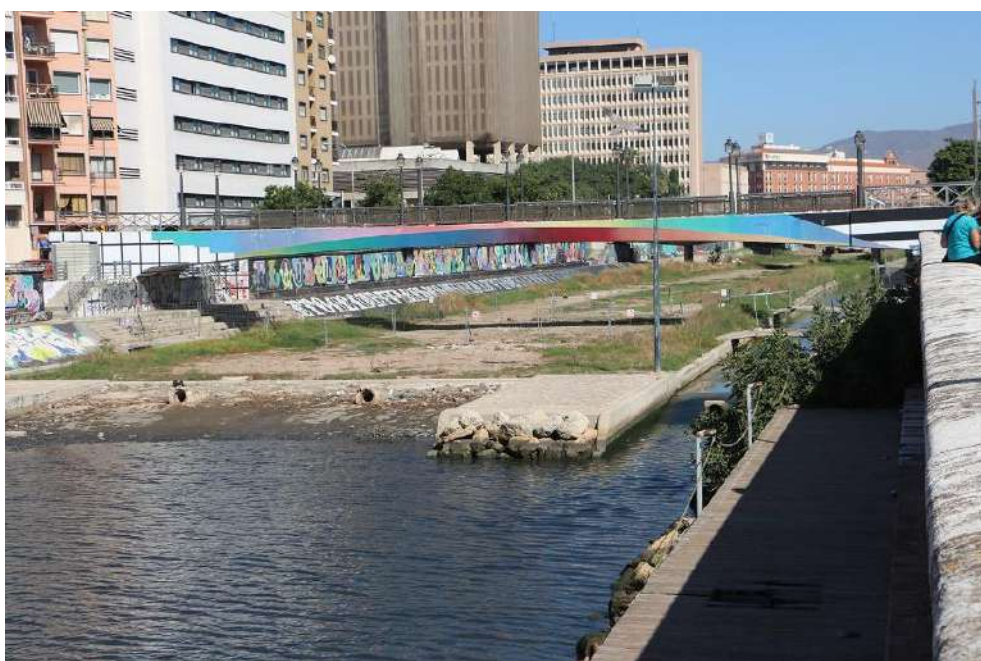


Imagen 55: Estado actual del encuentro del encauzamiento con el mar

Aunque las mareas hacen oscilar la superficie del mar en este punto, con una carrera de marea de 0.78 m según la red REDIAM, al haber un cambio abrupto de cota justo en ese punto, el agua llegará casi siempre al mismo P.K.

A partir de este punto, el río se convierte en una ría, donde el mar se adentra en el cauce. Consideraremos que el río/ría llega hasta donde la sección se abre al mar, en el muelle de San Andrés, en los planos el P.K. 6004.

Al igual que en el puente de la Misericordia, existen escaleras de acceso al río a ambos lados del puente del Perchel.

4.3.5. Desembocadura – Puente del Carmen P.K. 5+050.00 – P.K. 5+300.00

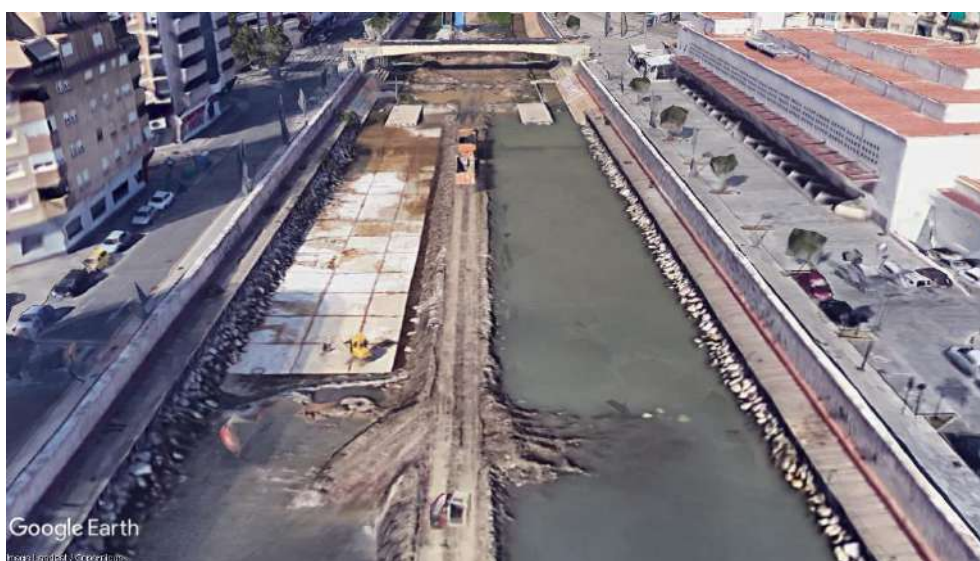


Imagen 56: Desembocadura río Guadalmedina. Fuente: Google Earth



Imagen 57: Puente Antonio Machado. Fuente: Google Earth

A partir de la desembocadura, la sección vuelve a cambiar, y estará siempre cubierta de agua.

En este caso, y debido a las mencionadas obras, se puede ver cómo es la sección del lecho de esta parte del río.

En los primeros 100 metros del cauce hay una plataforma de hormigón que favorece la eliminación de fangos que se quedan acumulados en esa parte del cauce, al no haber apenas circulación de agua. Este problema ha ocasionado malos olores históricamente, y se ha intervenido sobre el problema con medidas como unos bombeos que cogen agua de una zona más limpia del cauce (P.K. 5680 aprox.) y se bombea a la desembocadura, para forzar una cierta circulación del agua. Esta plataforma está en ambos lados del cauce, aunque la parte izquierda en estas imágenes está bajo el agua.

A partir de ese punto, el lecho es de tierra y fangos acumulados por la falta de circulación, que se limpiarán más o menos eficazmente en los episodios de avenidas.

En los laterales tenemos unas protecciones de escollera y muros laterales de hormigón.

Sobre la escollera, tenemos unas pasarelas de madera ancladas al muro, a las que se puede acceder desde el puente del Carmen por unas escaleras, y hace que el cauce sea accesible caminando desde este puente del Carmen, hasta el puente de la Aurora.

4.3.5.1. Puente del Carmen – Puente de Hierro. P.K. 5+300.00- P.K. 5+431.00



Imagen 58: Puentes del Carmen, Antonio Machado y Hierro. Fuente: Google Earth

La sección tipo continúa igual hasta el final del río, donde el cauce urbano sale a aguas más abiertas.

4.3.5.2. Puente de Hierro – Fin del cauce. P.K. 5+431.00 – P.K. 6+004.00



Imagen 59: Puentes de Hierro y Pescaderías. Fuente: Google Earth



Imagen 60: Fin de cauce de río. Fuente: Google Earth

La sección continúa prácticamente igual, excepto que unos metros aguas abajo del puente de Pescaderías, desaparece el muro del margen derecho, hasta que llegamos al final de lo que se considera el cauce del río Guadalmedina.

5. ESTUDIO HIDRÁULICO DEL ENCAUZAMIENTO ACTUAL

Los cálculos hidráulicos se realizan mediante IBER (versión 2.5.2). Se desarrolla un modelo bidimensional de toda la zona de cálculo, utilizando hidrogramas de caudales que se exponen en un epígrafe posterior.

IBER es un modelo matemático bidimensional para la simulación de flujos en ríos, desarrollado en colaboración por el Grupo de Ingeniería del Agua y del Medio Ambiente, GEAMA (Universidad de A Coruña, UDC) y el Instituto FLUMEN (Universitat Politècnica de Catalunya, UPC, y Centro Internacional de Métodos Numéricos en Ingeniería, CIMNE). El modelo IBER surge como respuesta al interés mostrado por el Centro de Estudios Hidrográficos del CEDEX en disponer de una herramienta que facilite la aplicación de la legislación sectorial vigente en materia de aguas, especialmente en los requerimientos derivados de la Directiva Marco del Agua, la Instrucción de Planificación Hidrológica, la Directiva de Inundaciones o el Plan Nacional de Calidad de las Aguas. Se han realizado las siguientes simulaciones hidráulicas, tanto para estado actual como futuro:

- Simulación para $Q = 30 \text{ m}^3/\text{s}$
- Simulación para $T = 10$ años
- Simulación para $T = 25$ años
- Simulación para $T = 100$ años
- Simulación para $T = 500$ años

A lo largo del presente apartado se detallan los diferentes aspectos de los modelos desarrollados (parámetros, tipos de modelización realizados, condiciones, etc.), para finalmente analizar los resultados obtenidos.

5.1. DESCRIPCIÓN Y DEFINICIÓN DEL MODELO HIDRÁULICO BIDIMENSIONAL IBER

El rango de aplicación de IBER abarca la hidrodinámica fluvial, la simulación de rotura de presas, la evaluación de zonas inundables, el cálculo de transporte de sedimentos y el flujo de marea en estuarios.

El modelo IBER consta actualmente de 3 módulos de cálculo principales: un módulo hidrodinámico, un módulo de turbulencia y un módulo de transporte de sedimentos. Todos los módulos trabajan sobre una malla no estructurada de volúmenes finitos formada por elementos triangulares o cuadriláteros.

En el módulo hidrodinámico, que constituye la base de IBER, se resuelven las ecuaciones de aguas someras bidimensionales promediadas en profundidad (ecuaciones de St. Venant 2D). El módulo de turbulencia permite incluir las tensiones turbulentas en el cálculo hidrodinámico,

pudiéndose utilizar para ello diferentes modelos de turbulencia para aguas someras con diferente grado de complejidad.

En la versión actual se incluyen un modelo parabólico, un modelo de longitud de mezcla y un modelo. El módulo de transporte de sedimentos resuelve las ecuaciones de transporte de fondo y transporte turbulento en suspensión, calculando a partir del balance de masa de sedimento la evolución de la cota.

5.2. CONTORNO DE SIMULACIÓN

En la siguiente imagen se muestra el contorno elegido para llevar a cabo la simulación hidráulica. Para su definición se ha adoptado una distancia suficiente entre las zonas por las que entra y sale el flujo de agua de forma que el modelo pueda estabilizarse adecuadamente en la zona de mayor interés para el análisis.



Ilustración 61: Contorno de la simulación hidráulica.

5.3. MODELO DEL TERRENO

El proceso de creación del modelo del terreno es un aspecto de suma importancia para el correcto funcionamiento del modelo bidimensional. Para la creación del modelo del terreno empleado en el modelo se ha partido del levantamiento topográfico que realizó la Empresa Municipal de Aguas de Málaga (EMASA S.A.) del encauzamiento del río. Se realizaron una serie de operaciones adicionales donde se eliminan los tableros de los puentes de la topografía y se añaden puntos a cota de la cara inferior de tablero en las pilas de los mismos, con objeto de determinar los calados resultantes en las secciones de estos. Para el resto de cartografía que queda fuera del ámbito del encauzamiento, se ha utilizado la cartografía del municipio de Málaga obtenida del Centro Nacional de Información Geográfica del ministerio de Transporte, Movilidad y Agenda Urbana.

Por último, se triangula la topografía realizada, consiguiendo el grado de resolución que se presente en la siguiente imagen.

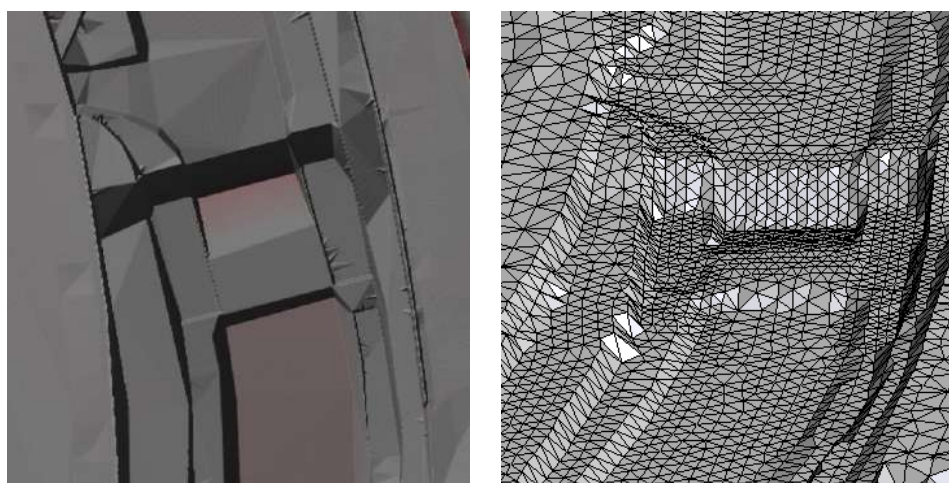


Ilustración 62: Modelo Digital del Terreno de la zona de estudio. A la izquierda se muestra un detalle de uno de los escalones (cadena) en la situación actual. A la derecha se muestra la malla triangular reproduciendo la topografía.

5.4. RUGOSIDADES

Las ecuaciones de flujo bidimensional precisan datos de los coeficientes de rozamiento espaciales que existen en la zona de estudio para incorporarla a las ecuaciones en forma de fuerzas de rozamiento. Al tratarse de un modelo bidimensional, el propio modelo tiene en cuenta factores como la sinuosidad y la irregularidad en las secciones.



Ilustración 63: Distribución espacial de la rugosidad por tipos de suelo

La determinación de la rugosidad del terreno se ha realizado en base normativa y bibliografía especializada, de forma que se han establecido las siguientes rugosidades:

- En tramos de cauce sin revestir, con presencia de vegetación $n = 0.050$
- En tramos de cauce sin revestir, con presencia escasa de vegetación $n = 0.035$
- Suelo desnudo $n = 0.020$
- Vegetación dispersa $n = 0.080$
- Hormigón $n = 0.020$
- Zona urbana fuera del cauce (pavimento) $n = 0.015$
- Escollera $n = 0.030$

Es preciso destacar que se han utilizado valores conservadores para tener en cuenta el posible envejecimiento y deterioro, especialmente el hormigón del cauce.



5.5. CARACTERÍSTICAS DEL FLUJO

Se han realizado las diferentes simulaciones hidráulicas para varios períodos de retorno, para lo cual se han introducido los caudales puntas de cada periodo de retorno en régimen estacionario. Los hidrogramas introducidos presentan una rama ascendente para mejorar la estabilidad del modelo, y posteriormente se mantienen constantes con el caudal punta indicado. Estos caudales son los siguientes:

- $Q_{oper} = 30 \text{ m}^3/\text{s}$
- $Q_{10} = 94 \text{ m}^3/\text{s}$
- $Q_{25} = 149 \text{ m}^3/\text{s}$
- $Q_{100} = 287 \text{ m}^3/\text{s}$
- $Q_{500} = 600 \text{ m}^3/\text{s}$

Estos valores se han obtenido de estudios previos, concretamente:

- El caudal operacional es el valor medio aproximado de desembalse de la presa del Limonero que se realiza mensualmente. Este caudal está ligado, por tanto, a operaciones de mantenimiento, que se consideran relevantes en estudio, especialmente para la situación futura.
- El caudal correspondiente a 600 m³/s (Q_{500}) procede del diseño de la presa del Limonero. Dicho valor fue el adoptado en el diseño y construcción del actual encauzamiento del Río Guadalmedina y constituye un dato de partida.
- El resto de período de retorno se han obtenido de estudios previos elaborados por EMASA. Sí es preciso indicar que se ha considerado estos caudales punta en todo el tramo, lo que queda del lado de la seguridad.

5.6. ESTRUCTURAS

Como se ha indicado anteriormente, las estructuras se han incorporado al modelo digital del terreno y se ha evitado su modelización dentro del modelo numérico hidráulico con herramientas auxiliares.

Esta decisión se basa en que la lámina de agua para el período de retorno de 500 años, y en situación actual, alcanza solo puntualmente el tablero de los puentes en algún caso. Resulta más realista la modelización de estas estructuras introduciendo las pilas como parte de la topografía, evitando de esta forma que la implementación de la estructura, que supone un elemento difícil de resolver. Los resultados obtenidos son adecuados y avalan este criterio.

5.7. CONDICIONES DE CONTORNO

Se han establecido las condiciones de contorno aguas arriba y aguas abajo del río.

- **Aguas arriba.** Caudal, como se ha indicado en el epígrafe anterior.
- **Aguas abajo.** En la desembocadura la condición de contorno impuesta es el nivel del mar. Este nivel no es constante debido a las mareas (astronómicas y meteorológicas). Si se produce una fuerte tormenta en un momento de marea viva, ambas se pueden combinar para producir un nivel del mar aún mayor que las provocadas de manera individual. Como los procesos estocásticos de lluvias intensas y de mareas no están estudiados de manera interrelacionada, no es posible establecer una combinación de caudal-posición del mar. Sin embargo, es razonable pensar que una lluvia así pueda presentarse durante una intensa borrasca, por lo que la presencia de una marea meteorológica alta puede ser previsible (aunque no necesaria, como sería el caso de una DANA). La coincidencia con una marea viva ya es más incierta, pero no se puede descartar. Habiendo tanta incertidumbre en estos aspectos, se ha decidido quedar del lado de la seguridad y adoptar como condición de contorno el nivel máximo del mar observado en el puerto de Málaga, 0.98 m.s.n.m. (metros sobre el nivel del mar).

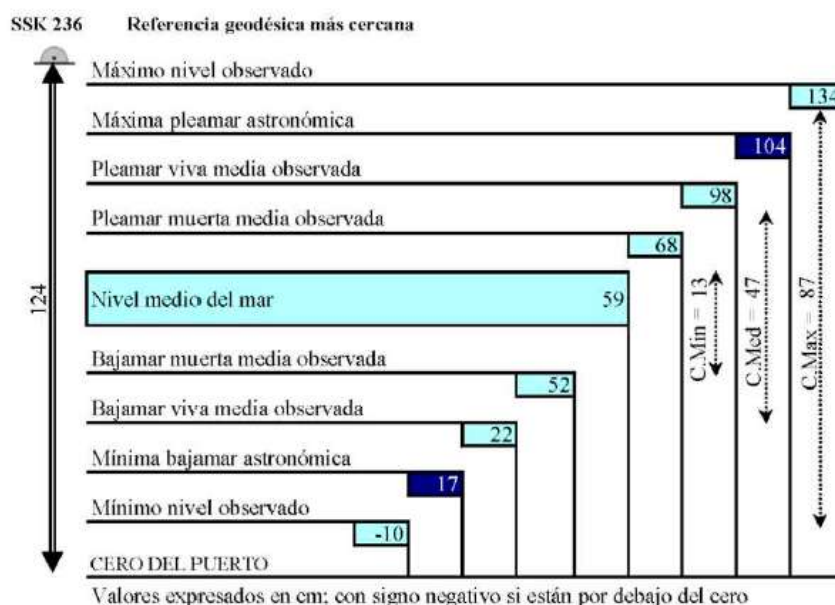


Ilustración 64: Niveles del mar observados en el Puerto de Málaga (Fuente: REDMAR).

No obstante, es preciso indicar que esta desembocadura se encuentra en un entorno micromareal, con carreras de marea (astronómica) reducidas, donde cobra especial importancia la componente de marea meteorológica. Sin embargo, se ha comprobado que, dada la pendiente y geometría del

cauce, esta condición de contorno no resulta determinante en los niveles de lámina de agua obtenidos en el cauce para períodos de retorno altos asociados a caudales mayores y que son los que pueden generar problemas de desbordamiento.

5.8. PARAMETROS DE LA SIMULACIÓN

5.8.1. Parámetros generales

Los parámetros generales de la simulación realizada se muestran en la siguiente tabla:

PARÁMETROS DE LA SIMULACIÓN	
Ecuaciones	Saint-Venant 2D
Esquema numérico	2º orden
CFL	0.40
Límite seco-mojado (m)	0.01
Módulo turbulencia	No

Tabla 3: Parámetros generales de la simulación

5.8.2. Parámetros de la malla

Se ha utilizado una malla no estructurada, basada en triángulos, con diferentes tamaños de lado mínimo en función de la zona del encauzamiento que se está modelando. De esta forma, se aporta una mayor densidad de mallado a la zona de escalones, puentes y muros laterales.

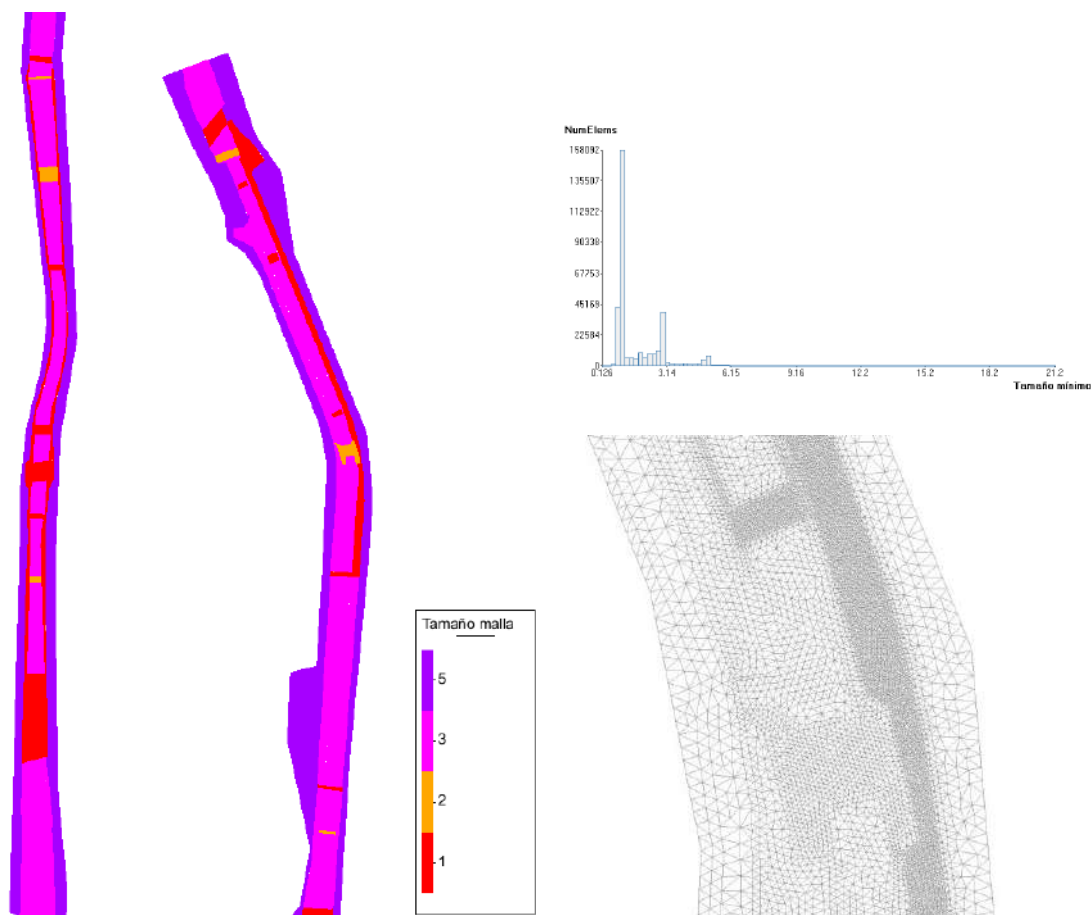


Ilustración 65: Características del mallado. Se dividen las superficies por el lado mínimo impuesto (izquierda). Una vista de detalle de una zona del modelo (inferior derecha) y distribución de las celdas en función de su lado mínimo, donde se observa que predomina el tamaño inferior a 1 m (superior derecha).

5.8.3. Parámetros de tiempo

El tamaño de celda y el tiempo de cálculo utilizados deben ser consistentes, de tal modo que se satisfaga la condición de Courant en los términos necesarios para que el cálculo sea estable y preciso.

Como ya se ha indicado se ha impuesto una $CFL = 0.4$, y se realizan las simulaciones durante un tiempo total de 3600 s, obteniéndose resultados cada 300 s.

5.9. RESULTADOS DE LAS SIMULACIONES

En las imágenes siguientes se muestran los resultados obtenidos para cada período de retorno de las dos variables hidrodinámicas principales: calado y velocidad.

En primer lugar, se muestran estos resultados para el caudal operacional de $30 \text{ m}^3/\text{s}$. Los valores de calado no son relevantes ya que son muy reducidos e incluso el flujo se concentra en los pequeños canales laterales existentes al final del tramo. Los valores de velocidad son más relevantes ya que proporcionan un parámetro de referencia muy adecuado para el posterior análisis del estado reformado de la situación futura. Se puede observar que, en los tramos con pendiente constante, no se superan los 2 m/s . Mientras que en los saltos, como era previsible, se produce una aceleración del flujo que conduce a valores superiores, aunque no se superan los 6 m/s .

Para el período de retorno de 10 años se observa que los calados aumentan significativamente y la avenida ya ocupa toda la anchura del encauzamiento, aunque con valores por debajo de los 3 m . En el caso de las velocidades, se mantienen en casi todo el tramo por debajo de los 2 m/s , salvo en la zona final (a partir del puente de Armiñán) en que aumentan ligeramente hasta máximos más cercanos a los 3 m/s . Nuevamente, esta afirmación excluye los saltos y caídas, donde se observan zonas localizadas con valores que superan puntualmente los 6 m/s . Una de estas zonas se localiza en el puente de la Aurora, donde se ha descrito con anterioridad que existe un rápida, que provoca una aceleración del flujo.

Los resultados obtenidos para un período de retorno de 25 años están en la línea del caso anterior, con incremento de valores de calado y velocidad, en toda la anchura del encauzamiento. No se producen incrementos muy significativos ya que son caudales del orden de magnitud.

En cuanto al período de retorno de 100 años, se observan calados próximos a los 4 m , aguas arriba del puente de Palmilla y en el entorno del puente de Tetuán. No se aprecian desbordamientos fuera de los muros del encauzamiento. Las velocidades, para este escenario, se sitúan en torno a 4 m/s en los tramos de pendiente constante e incluso superan de forma localizada los 6 m/s . Las zonas de saltos y caídas estos valores aumentan hasta resultados máximos próximos a 10 m/s en algunos puntos.



El período de retorno de 500 años conduce a valores de calado por encima de los 4 m, especialmente aguas arriba del puente de Palmilla, y aguas abajo del puente de Armiñán, así como en el entorno del puente de Tetuán. Se observan desbordamientos puntuales, de calado inferior a 50 cm, al inicio del tramo en la margen izquierda. El perfil longitudinal muestra también que la lámina de agua está muy próxima, o incluso alcanza, la cara inferior de algunos tableros. Este resultado está en consonancia con las observaciones realizadas en campo por la Gerencia de Urbanismo. Por otra parte, las velocidades en los tramos de pendiente constante se sitúan en máximos de 5 m/s, e incluso alcanzan los 6 m/s aguas abajo del puente de la Aurora. Los valores puntuales máximos en caídas y saltos se aproximan a 10 m/s.