

Efectos de las mareas sobre las avenidas del río Iro en Chiclana de la Frontera (Cádiz)

JUAN JOSÉ MUÑOZ PÉREZ (*), JUAN CARLOS DE LA CRUZ BARROSO (**),
PEDRO VALDÉS DEL FRESNO (***)

RESUMEN La ciudad de Chiclana de la Frontera (Cádiz) ha sufrido en numerosas ocasiones las inundaciones producidas por el río Iro. En este artículo, se analizan las causas de esta situación, que derivan fundamentalmente de actuaciones antrópicas en las márgenes, obstaculizando las bermas de inundación del cauce aguas abajo del núcleo urbano. Asimismo, se describen las obras de encauzamiento realizadas en los últimos años, y se detalla el modelo de cálculo utilizado para obtener las láminas de avenida. Este modelo tiene en cuenta las variaciones del nivel mareal en la desembocadura, las condiciones de desagüe del río en el mar, y las variaciones del caudal de avenida en la embocadura del tramo encauzado.

EFFECTS OF THE TIDES OVER THE SPATES OF THE RIVER IRO IN CHICLANA DE LA FRONTERA

ABSTRACT *The city of Chiclana de la Frontera (Cádiz) has suffered in numerous occasions the floods from the Iro river. In this article are analyzed the causes of this situation, that are basically a consequence of mankind actions in the margins, obstructing the riverbed downstream of the city centre. Also, there are described the channeling works carried out in the last years, and is detailed the calculation system used. This model consider the variations in the level of tides at the mouth, the drainage conditions of the river at sea, and the variations of the spate in the mouth of the channeled section.*

Palabras clave: Avenidas; Mareas; Inundaciones; río Iro; Cádiz.

1. ANTECEDENTES

La ciudad de Chiclana de la Frontera (Cádiz) alcanza en estas fechas su séptimo centenario, desde que en el año 1303 fue objeto de donación por parte del rey Fernando IV a Don Alonso Pérez de Guzmán para que la repoblase.

Situada al Sureste de la Bahía de Cádiz (Fig 1), fue construida inicialmente sobre un montículo que se levanta en la margen izquierda del Río Iro. A finales del siglo XVII, se produjo una gran expansión demográfica en la villa, que coincidió con el traslado al puerto de Cádiz de la Flota de Indias y de la Casa de Contratación, causando el desarrollo del núcleo urbano hacia las márgenes del río. Desde entonces, la ciudad viene manteniendo una relación conflictiva con el río, habiendo sido asolada en numerosas ocasiones por sus avenidas.

Diversas actuaciones antrópicas, además de la ocupación urbana de las márgenes, han contribuido en los últimos decenios a este duradera y permanente pugna.

En primer lugar, se acometieron grandes movimientos de tierras, aguas abajo del núcleo urbano, para construir salinas en las márgenes del río, obstaculizando gravemente su función hidráulica. El trazado sinuoso de los esteros, y el acopio de los productos de excavación en los bordes del cauce impiden en efecto la circulación de los caudales de avenida por las bermas de inundación del río, reduciendo enormemente su capacidad de desagüe.

En segundo lugar, hay que mencionar la construcción en los años 60 del llamado Puente de Puercas, que se concibió al parecer con la doble función de obra de paso sobre el río, y de elemento regulador de los caudales mareales, los cuales se pretendían almacenar para diluir las aguas fecales que entonces se vertían al río. Estaba dotado de una serie de compuertas metálicas que debían cerrarse en pleamar, y abrirse periódicamente con la marea vaciante. El sistema no prosperó, y cayó en completo desuso al construirse la estación depuradora de aguas residuales aguas abajo del núcleo urbano. El puente perduró con sus compuertas abiertas, constituyendo un serio obstáculo hidráulico debido a sus numerosas pilas, y a que el tablero se proyectó a una cota excesivamente baja.

En esos años se ejecutó también una corta del río para eliminar dos meandros por donde serpenteaba el cauce entre las salinas, pero con escasa sección transversal, por lo que tampoco mejoró sustancialmente la precaria situación de la población.

(*) Ingeniero de Caminos, Canales y Puertos. Doctor en Ciencias Físicas. Demarcación de Costas de Andalucía - Atlántico.

(**) Ingeniero de Caminos, Canales y Puertos. Consejería de Obras Públicas de la Junta de Andalucía.

(***) Ingeniero de Caminos, Canales y Puertos. URBACONSULT.

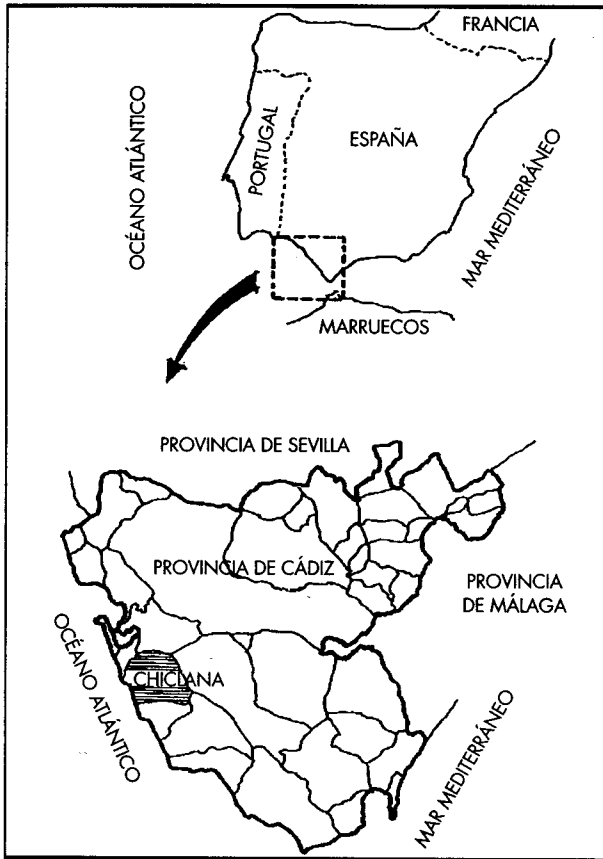


FIGURA 1. Situación del río IRO (T.M. de Chiclana, Cádiz).

Todas estas actuaciones se representan esquemáticamente en la figura nº 2.

En el año 1999, por encargo de la Consejería de Obras Públicas de la Junta de Andalucía se iniciaron las obras de encauzamiento del río en todo el núcleo urbano, reforzando el encauzamiento existente, y prolongándolo hacia aguas arriba. Al mismo tiempo, se acometieron estudios para alcanzar una solución integral del problema que defendiera la ciudad de las avenidas con periodos de retorno del orden de 500 años. El resultado de estos estudios fue en síntesis el siguiente:

- El caudal de avenida asociado a un periodo de retorno de 500 años, calculado a la entrada del encauzamiento urbano, resultó ser del orden de 350 m³/s, mientras la capacidad del cauce existente aguas abajo de dicho encauzamiento era del orden de 100 m³/s.
- Esta situación era la causa principal de las frecuentes inundaciones del núcleo urbano, que quedaba expuesto a ellas con periodos de retorno inferiores a 5 años.
- La ejecución de una gran ampliación del cauce aguas abajo del encauzamiento urbano, hasta la desembocadura del río en el Caño de Sancti Petri, podía devolverle una capacidad del orden de 340 m³/s, suficiente para entregar al mar avenidas con periodos de retorno del orden de 400 años.
- Dicha ampliación requería la demolición del Puente de Compuertas y su sustitución por otra obra de paso con el tablero situado a mayor altura.
- Para alcanzar mayores periodos de retorno, era necesario laminar las avenidas mediante una o varias presas de regulación.

Debido a la precaria situación de la población, se optó por la solución de ampliar el cauce aguas abajo del encauzamiento urbano, considerando que durante el plazo de proyecto y ejecución de las presas de laminación podían produ-

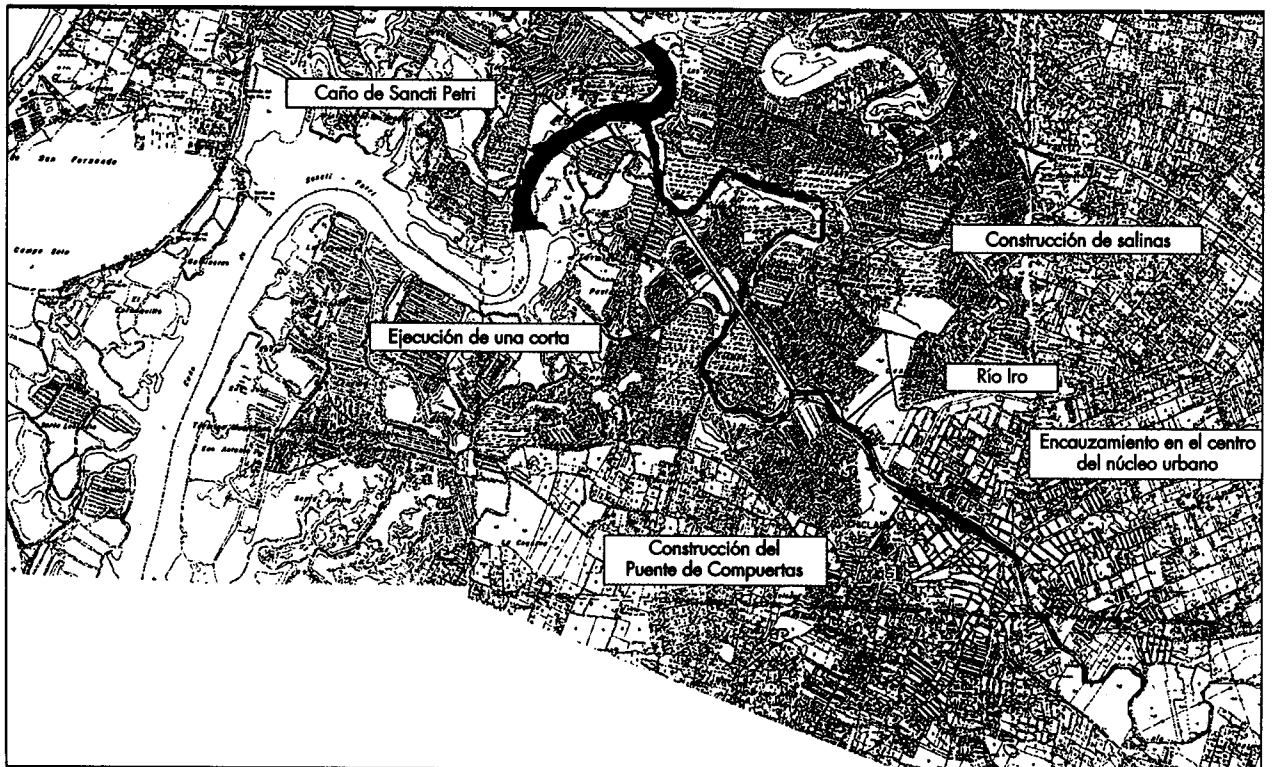


FIGURA 2. Actuaciones sobre el río IRO anteriores a 1999.

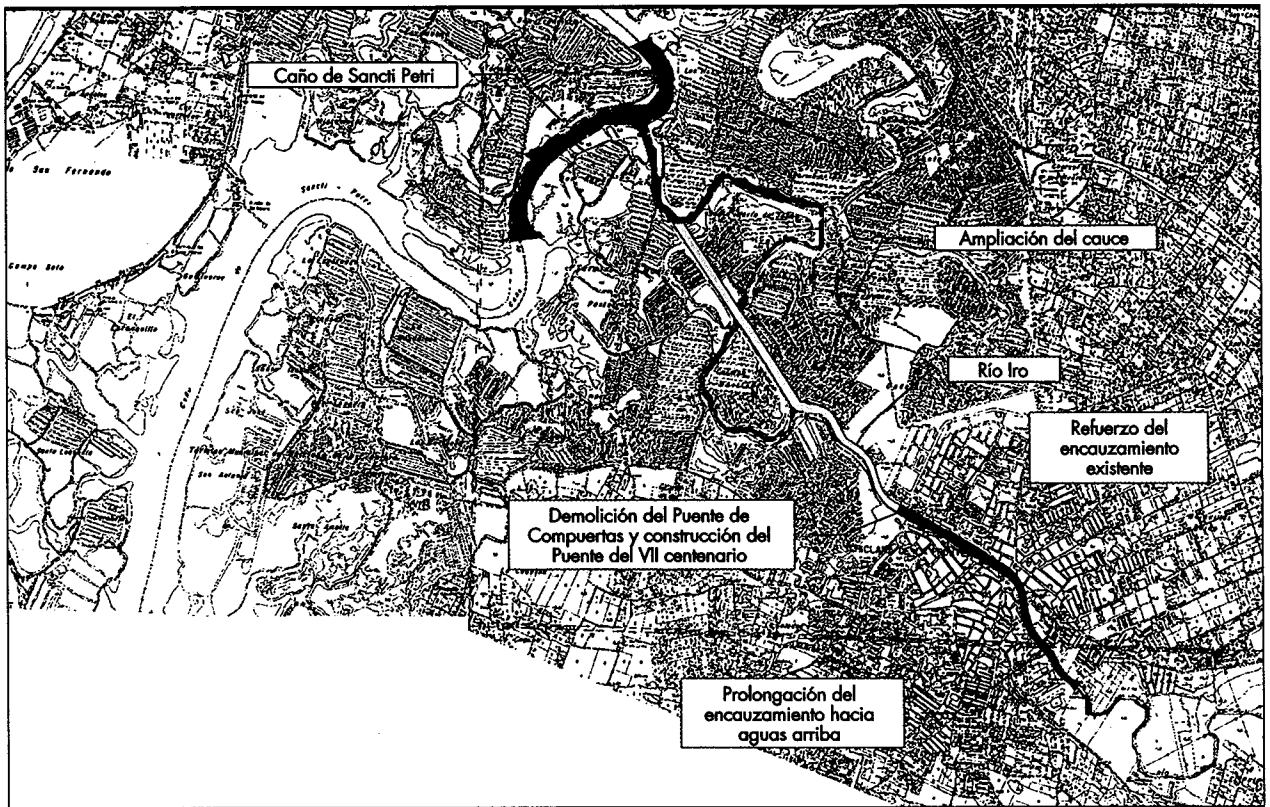


FIGURA 3. Actuaciones sobre el río IRO posteriores a 1999.

cirse, con elevada probabilidad, avenidas que hubieran causado daños de importe superior al coste de estas obras. Además, este ensanchamiento permitiría disminuir los volúmenes de embalse de las presas, y abaratar por tanto su coste.

En consecuencia se acometieron, entre los años 1999 y 2001, las obras que se representan en la figura nº 3, también esquemáticamente, y que son resumidamente las siguientes:

- Refuerzo del encauzamiento existente mediante muros prefabricados de hormigón armado, habilitando paseos laterales en las márgenes.

- Prolongación de dicho encauzamiento hacia aguas arriba, hasta la entrada del río en el núcleo urbano, mediante muros de hormigón armado ejecutados in situ, cimentados sobre pilotes.
- Demolición del Puente de Compuertas (Foto 1) y construcción de un nuevo puente aguas abajo del mismo, de un solo vano de 60 m de luz, con tablero atirantado desde dos arcos metálicos (Foto 2).
- Ampliación del cauce aguas abajo del nuevo puente, hasta su desembocadura en el Caño de Sancti Petri (Foto 3).

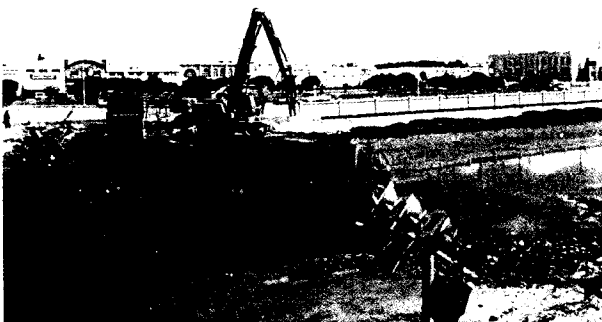


FOTO 1. Demolición del antiguo Puente de Compuertas. Se aprecia el estrechamiento de la sección y la baja cota del tablero.



FOTO 2. Construcción del nuevo puente de un solo vano con tablero atirantado desde dos arcos.

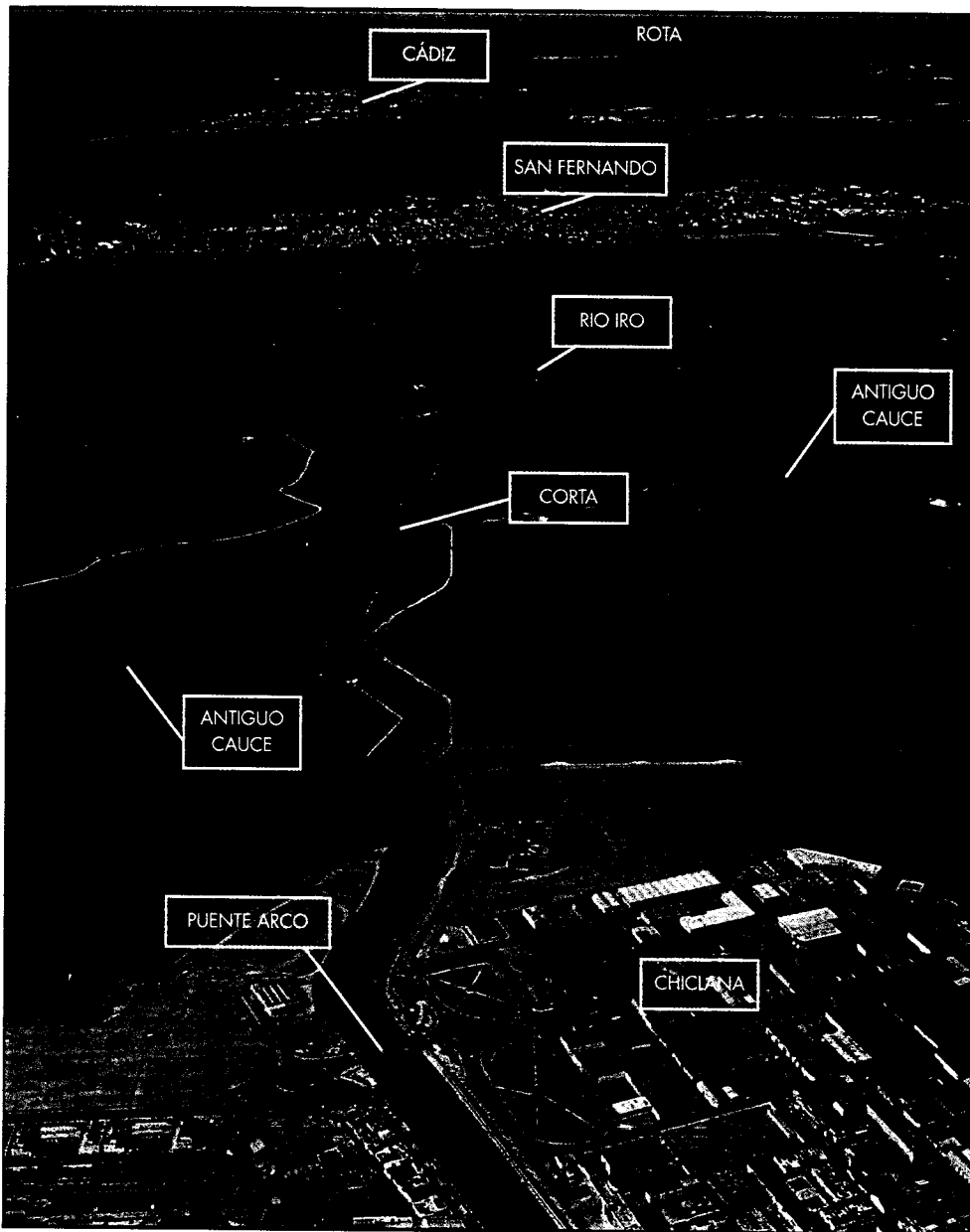


FOTO 3. Vista donde se aprecia el río IRO desde su salida de Chiclana bajo el puente arco, el trazado sinuoso antiguo, la corta y su desembocadura en el caño Sancti Petri cerca de San Fernando y la Bahía con la ciudad de Cádiz al fondo.

Para el cálculo y dimensionamiento de estas obras, fue necesario modelizar el comportamiento del río durante las avenidas, teniendo en cuenta el efecto sobre las mismas de las mareas. (Tejedor y Bruno, 1996; Vidal, 2002).

Tal efecto es evidente no solamente mediante la observación de los caudales mareales, que alcanzan varios kilómetros aguas arriba del núcleo urbano, sino que también habían sido advertidas, durante algunas avenidas, extrañas situaciones, donde el tramo final del río no se desbordaba mientras que el núcleo urbano y sus alrededores quedaban inundados por la crecida.

2. MODELO DE CÁLCULO

2.1. BASES DEL MODELO

El modelo de cálculo utilizado se basa en considerar un régimen uniformemente variado no permanente en el cauce, que

se establece una vez que el caudal mareal se integra en el caudal de avenida.

Diversas simulaciones realizadas para representar la interacción de un caudal mareal entrante con un caudal de avenida significativamente mayor indican, en efecto, que el primero es rápidamente frenado y absorbido por el segundo. A partir de este momento, las variaciones temporales del régimen se establecen, en la embocadura del tramo, como consecuencia de la variación del caudal entrante, y en la desembocadura, como consecuencia de la variación del nivel medio del mar.

Las ecuaciones simplificadas que rigen un flujo no permanente en un canal abierto de forma arbitraria son:

$$\frac{dA}{dt} = u \cdot \frac{dA}{dx} - A \cdot \frac{du}{dx} \quad (1)$$

$$\frac{\partial u}{\partial t} = -g \cdot \left(\frac{\partial E}{\partial x} + S_f \right) \quad (2)$$

donde la ecuación (1) es la ecuación de continuidad del flujo, y la (2) expresa la conservación de la cantidad de movimiento, con el siguiente significado de los parámetros:

- u = velocidad media
- g = gravedad
- A = área hidráulica
- x = distancia longitudinal
- y = calado
- t = tiempo
- E = energía del flujo
- S_f = pendiente de fricción

La energía E y la pendiente de fricción S_f vienen dadas por las conocidas expresiones:

$$E = z + y + \frac{u^2}{2g} \quad (3)$$

$$S_f = \frac{n^2 \cdot u \cdot |u|}{R_H^{4/3}} \quad (4)$$

siendo n el coeficiente de rugosidad de Manning, y R_H el radio hidráulico.

Estas ecuaciones permiten, si se conoce en una sección determinada la variación temporal del calado y la velocidad, calcular la variación espacial de dichas variables.

El método de resolución del problema arranca por tanto de un determinado régimen permanente que rige en el cauce en el instante inicial t, a partir del cual se producen determinadas variaciones temporales del calado y la velocidad en la sección de desagüe del canal. Conocidas en esta sección dichas variaciones, las ecuaciones del régimen permiten calcular las derivadas espaciales de primer orden de ambas variables, con las que se obtiene el calado y la velocidad en la sección situada inmediatamente aguas arriba. Iterando el proceso, resulta una nueva lámina y un nuevo reparto de velocidades en el instante t+dt.

Este método de integración es sencillo y rápido, si bien presenta el inconveniente de suponer conocidas las funciones y₀(t) y u₀(t), que describen respectivamente la evolución temporal del calado y la velocidad en la desembocadura, cuando en realidad solo se conoce una relación entre ambas funciones, tal como se verá en el siguiente apartado.

Sin embargo, es posible añadir una segunda condición de contorno en la sección de salida, haciendo variar la función u₀(t) hasta obtener en la embocadura un caudal entrante cuya evolución temporal sea similar al hidrograma de avenida. Mediante este artificio, se transforma la condición de contorno que rige en la sección de entrada al canal en otra condición que rige de forma equivalente en la sección de salida. Ello facilita el proceso de integración numérica, y elimina los problemas de convergencia que se plantean cuando las ecuaciones del régimen deben resolverse con una condición de contorno en la entrada y otra en la salida.

$$\frac{\partial A}{\partial t} = -u \cdot \frac{\partial A}{\partial x} - A \cdot \frac{\partial u}{\partial x} \quad (5)$$

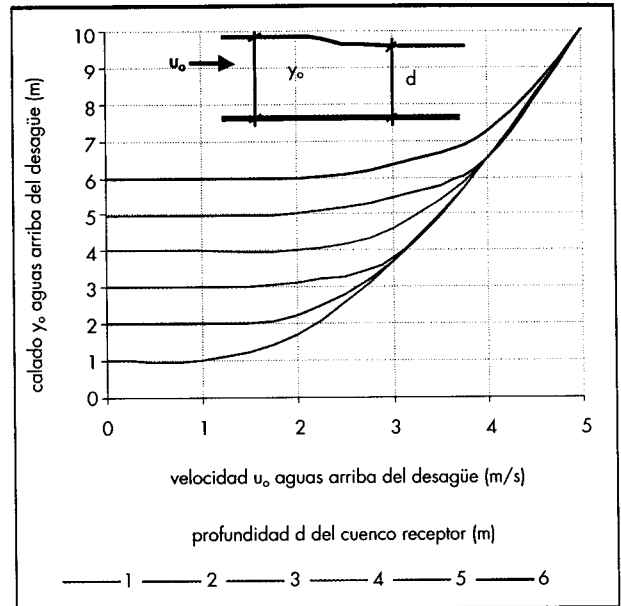


FIGURA 4. Calado aguas arriba del desagüe en función de la profundidad del cuenco receptor (d) y de la velocidad (u₀).

2.2. CONDICIONES EN LA SECCIÓN DE SALIDA

Es habitual, en la sección de desagüe del cauce, igualar el calado al nivel medio del mar o del cauce receptor. Esta hipótesis puede ser sin embargo inexacta para grandes caudales, o para pequeñas profundidades del cuenco receptor.

De acuerdo con los ensayos realizados por el USBR (1983) sobre diferentes cuencos amortiguadores, se puede establecer una relación entre la velocidad y el calado inmediatamente aguas arriba de la desembocadura, y la profundidad del cuenco de desagüe. Esta relación se representa gráficamente en la figura nº 4.

En esta figura se observa como:

- para velocidades aguas arriba de la desembocadura pequeñas ($v < 0,89 \cdot d^{0,44}$), el calado aguas arriba de la misma es igual a la profundidad del cuenco, sin que exista desnivel entre la lámina aguas arriba y abajo de la sección de desagüe
- para velocidades aguas arriba de la desembocadura grandes ($v > 1,76 \cdot d^{0,51}$), el nivel de la lámina aguas arriba es significativamente mayor que el nivel de la lámina en el cuenco, aproximándose este caso al de un vertedero sobre pared gruesa
- para velocidades de llegada a la desembocadura medias ($0,89 \cdot d^{0,44} < v < 1,76 \cdot d^{0,51}$), se está en un caso intermedio, donde el nivel de la lámina aguas arriba es ligeramente superior al nivel de la lámina en el cuenco.

Analíticamente, estas relaciones se expresan mediante la ecuación $f(y_0, u_0, d) = 0$, donde la profundidad d del cuenco de desagüe depende a su vez del nivel medio del agua impuesto por la marea, siendo por tanto las condiciones de contorno en la sección de salida:

$$\begin{aligned} f(y_0, u_0, d) &= 0 \\ d &= d(t) \\ u_0 &= u_0(t) \end{aligned}$$

las cuales se reducen obviamente a las dos condiciones establecidas en el apartado anterior:

$$\begin{aligned} y_0 &= y_0(t) \\ u_0 &= u_0(t) \end{aligned}$$

3. COMBINACIONES DE CÁLCULO

Se pueden establecer numerosas combinaciones de cálculo según la posición relativa del instante de inicio de la avenida en el ciclo mareal, y la duración de la fase creciente del hidrograma.

En el caso del río Iro, y con objeto de simplificar el número de estas combinaciones, se ha admitido que la solicitación pésima del cauce corresponde a un aumento del caudal de entrada de $100\text{ m}^3/\text{s}$ a $340\text{ m}^3/\text{s}$ en 6 horas, (disminuyendo del lado de la seguridad en 1h la duración de la fase ascendente del hidrograma), y que dicha variación del caudal de entrada puede producirse en alguna de las siguientes situaciones:

1) La crecida se inicia en pleamar y termina en bajamar

Este caso corresponde al desarrollo de la avenida con marea vaciante, y supone que mientras el caudal de entrada aumenta de $100\text{ m}^3/\text{s}$ a $340\text{ m}^3/\text{s}$ en 6 horas, el nivel del mar en el cuenco de desagüe disminuye 1,7 m.

2) La crecida se inicia en bajamar y termina en pleamar

Este caso corresponde inversamente al desarrollo de la avenida con marea creciente, y supone que mientras el caudal de entrada aumenta de $100\text{ m}^3/\text{s}$ a $340\text{ m}^3/\text{s}$ en 6 horas, el nivel del mar en el cuenco de desagüe aumenta 1,7 m.

En las figuras 5 y 6 se aprecian los caudales diferenciales entre la entrada y la salida a lo largo del tiempo y en función de si la marea está creciendo o vaciando.

4. LÁMINAS DE AVENIDA

La evolución de las láminas de avenida en cada uno de estos dos casos (marea vaciante y marea creciente) se presenta en las figuras nº 7 y 8.

Para las avenidas que se presentan con marea decreciente, el caudal de entrada es inicialmente inferior al de salida, siendo la máxima diferencia de $-5\text{ m}^3/\text{s}$ a las 1,5 h; posteriormente, el caudal de entrada se hace mayor que el de salida, siendo la máxima diferencia de $9\text{ m}^3/\text{s}$ a las 4 h.

Para las avenidas que se presentan con marea creciente, el caudal de entrada es siempre mayor que el de salida, siendo la máxima diferencia de $15\text{ m}^3/\text{s}$ a las 3 h.

La diferencia entre el caudal de entrada y el de salida se traduce lógicamente en variaciones espacio-temporales del nivel de la lámina de avenida. En efecto, si el caudal de entrada es mayor que el de salida, la diferencia debe almacenarse en el cauce, con la consiguiente sobre elevación de la lámina; y viceversa, si es inferior, debe disminuir el nivel de la misma en tanto se mantenga dicha diferencia a lo largo del tiempo.

Debido a que los máximos caudales diferenciales se producen aproximadamente a las 3 ó 4 h del inicio de la avenida, cuando aún no se ha alcanzado el caudal punta en la sección de entrada, los máximos aumentos temporales del nivel de la lámina ocurren cuando el cauce no está completamente lleno, por lo que pueden ser admitidos sin desbordamientos por el encauzamiento proyectado.

Interesa observar también que cuando se alcanza el caudal punta de avenida, al cabo de las 6 h, el caudal diferencial entre la entrada y la salida es nulo, por lo que las situa-

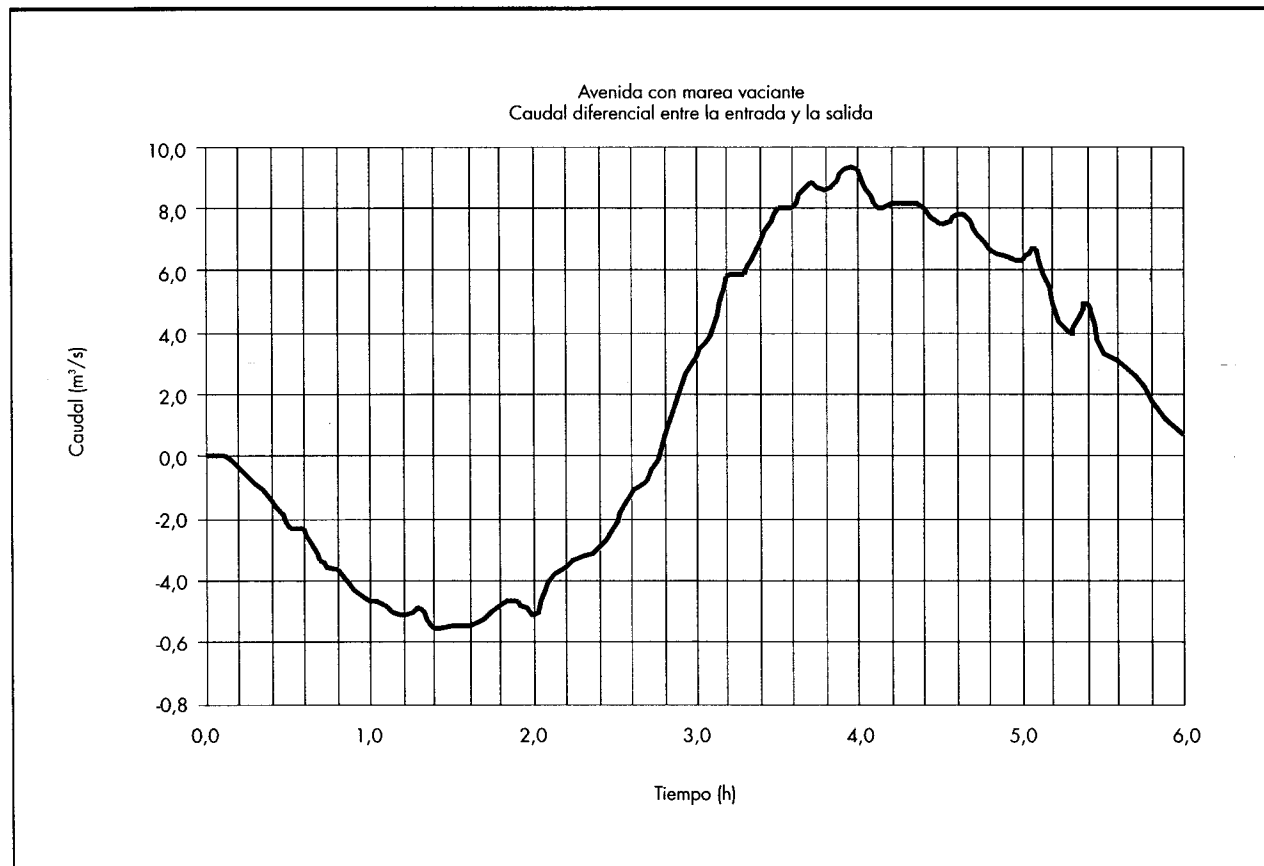


FIGURA 5. Caudal diferencial entre la entrada y la salida en función del tiempo para marea vaciante.

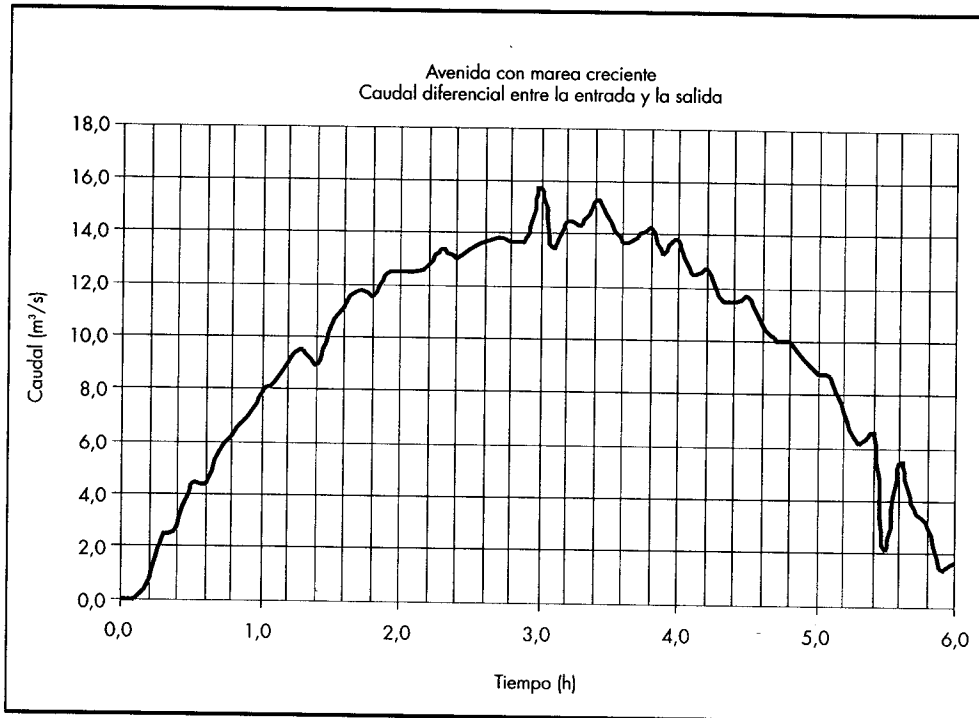


FIGURA 6. Caudal diferencial entre la entrada y la salida en función del tiempo para marea creciente.

ciones pésimas de desbordamiento pueden aproximarse razonablemente mediante un cálculo en régimen permanente,

que viene a coincidir con el cálculo en régimen no permanente durante la punta de la avenida.

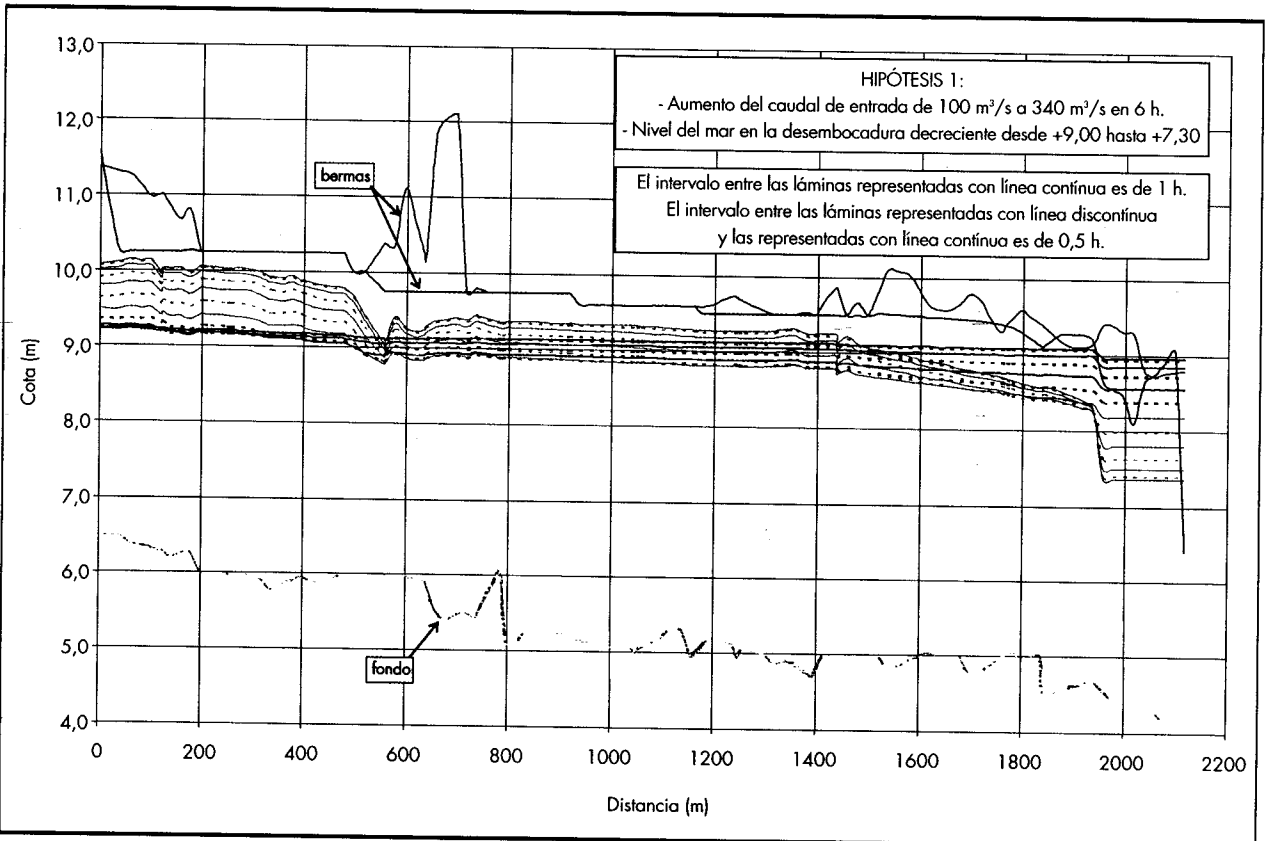


FIGURA 7. Lámina de avenida en función del tiempo para marea decreciente.

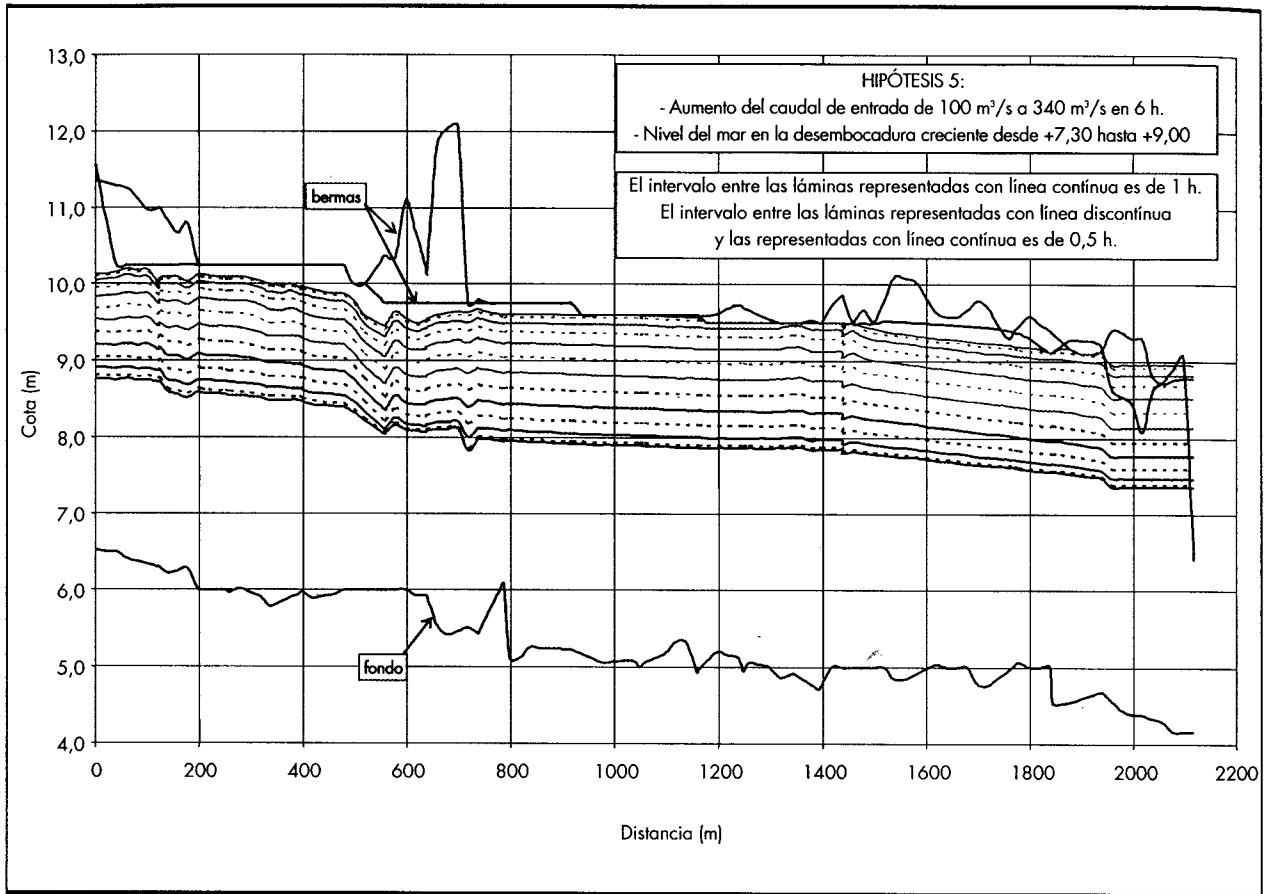


FIGURA 8. Lámina de avenida en función del tiempo para marea creciente.

5. CONCLUSIONES

A partir del análisis de las láminas de avenida y de los resultados del cálculo, se pueden establecer las siguientes reglas de comportamiento del río en régimen no permanente y las siguientes conclusiones:

- 1) Existen diferencias temporales entre el caudal de entrada y el de salida, que dependen fundamentalmente del nivel del mar en la desembocadura. Estas diferencias se traducen en variaciones espacio-temporales del nivel de la lámina, que se hacen máximas a las 3 ó 4 h del inicio de la avenida, cuando el cauce aún no está completamente lleno, por lo que son admitidas por este sin desbordamientos.
- 2) Cuando se produce la punta de la avenida, el caudal diferencial entre la entrada y la salida es nulo, pudiendo entonces aproximarse las láminas de avenida mediante una integración en régimen permanente.
- 3) Las condiciones más desfavorables para el desbordamiento del cauce corresponden a avenidas que se presentan en pleamar o con marea creciente, las cuales pueden producir un desbordamiento generalizado del cauce. Por el contrario, las avenidas que se producen en bajamar o con marea decreciente solo pueden desbordar el cauce en el tramo inicial. En relación con estas segundas avenidas, es interesante observar como el nivel de la lámina en el tramo final descende o se mantiene constante, mientras en el tramo inicial aumenta considerablemente.

- 4) Las relaciones expuestas en el apartado 2 entre el calado y la velocidad aguas arriba de la desembocadura, y el calado del cuenco de desagüe, regulan la entrega al mar de los caudales de avenida. En las representaciones gráficas de las láminas de avenida se observa que estas leyes pueden producir sobreelevaciones de la lámina inmediatamente aguas arriba del cuenco que no deben ser ignoradas.
- 5) Los autores señalan finalmente que solo la metodología es generalizable. Las conclusiones extraídas se refieren exclusivamente al caso específico estudiado, y no pueden ser extrapoladas a otros cauces o situaciones, aunque aparentemente fuesen similares.

6. REFERENCIAS

FRENCH R. "Hidráulica de canales abiertos": McGraw - Hill, 742 pag, 1988.
 OSUNA A. "Hidráulica". Apuntes de la Escuela Técnica Superior de Ingenieros de Caminos, Canales y Puertos. Madrid
 TEJEDOR MARTÍNEZ, L. y M. BRUNO, "Niveles del Mar en la Bahía de Cádiz". Estudios para la ordenación, planificación y gestión de las zonas húmedas de la Bahía de Cádiz. Oikos-tau. Barcelona. 1996, pags 185-212.
 U.S.B.R. (United States Bureau of Reclamation) "Diseño de pequeñas presas". (Compañía Edit. Continental, S.A.), 639 pag, 1983.
 VIDAL, J.M. "Caracterización dinámica de la marea y del sedimento en el caño de Sancti-Petri". Tesis doctoral. Universidad de Cádiz, 2002. Pag 190.