

RECONSTRUCCIÓN DE UN CURSO TORRENCIAL EN SU AFLUENCIA EN EL PARQUE NACIONAL DE DOÑANA (ESPAÑA)

Juan Ángel Mintegui Aguirre, José Carlos Robredo Sánchez, Carlos de Gonzalo Aranoa y Pablo Huelin Rueda

Unidad de Hidráulica e Hidrología, Departamento de Ingeniería Forestal, Escuela Técnica Superior de Ingenieros de Montes, Universidad Politécnica de Madrid
Cuidad Universitaria s/n, 28040 Madrid (España), Teléfono +34 91 3367118
E-mail: juanangel.mintegui@upm.es - Web: <http://www.montes.upm.es>

RESUMEN

La comunicación muestra la metodología de restauración de un curso torrencial, que en ningún caso se trata de una actuación única, sino de una sucesión de actuaciones, a modo de aproximaciones sucesivas, que van adecuando las obras y las disposiciones espaciales del proyecto a la dinámica torrencial del curso a corregir; hasta conseguir para éste la funcionalidad que tenía en el pasado y a ser posible también su naturalidad. Para ello se describe el Seguimiento del proyecto de corrección del tramo final del arroyo del Partido; un curso de carácter torrencial que fue objeto de un encauzamiento en 1981 en su tramo anterior a su desembocadura en la marisma del Parque Nacional de Doñana (Andalucía, España). Dicho encauzamiento obligó a las avenidas del arroyo a concentrarse, en un emplazamiento donde hasta entonces se expansionaban formando su primitivo cono de sedimentación. Ello motivo la formación de un nuevo cono de sedimentación al término del canal sobre la propia marisma del Parque Nacional. El proyecto de corrección se realizó en el 2006, formando parte de la Actuación núm. 3 del Programa de Recuperación Hídrica del Parque Nacional de Doñana, conocido como Proyecto Doñana 2005, y el Seguimiento descrito entre 2007-09.

Palabras clave: eventos torrenciales; defensa ante avenidas; corrección hidrológica; restauración ecológica.

ABSTRACT

The communication shows a methodology for a torrential stream restoration, which is in no case considered as a single action, but a succession of performances, by way of successive approximations, which adapts the works and spatial arrangements of the project to the torrential dynamics of the stream to be corrected; in order to get the stream functionality that it had in the past and, if possible, also get its naturalness. We describe the Monitoring of the correction project of the last reach of the El Partido stream, which is a torrential stream draining into the marshes of the Doñana National Park (Andalucía, Spain) channeled in 1981. The channelization forced the stream to concentrate the flow in the same site where previously the flow was expanded forming an alluvial fan. This circumstance caused the formation of a new alluvial fan at the end of the channel, over the National Park marsh. The correction project was carried out in 2006, forming part of the Performance #3 of the Water Recovery Program of the Doñana National Park, known as Project Doñana 2005, and the described Monitoring between 2007 and 2009.

Keywords: torrential events; flood protection; hydrological correction; ecological restoration.

INTRODUCCIÓN

Un curso torrencial es aquel en el que, ante la ocurrencia en su cuenca vertiente de eventos torrenciales (sean aguaceros o fusiones repentinas del manto de nieve), aparece de manera súbita una descarga líquida y sólida importante, es decir, una crecida o avenida con un caudal sólido significativo incorporado a su corriente, lo que provoca una aceleración del ciclo del agua y de los sedimentos en la superficie de la cuenca y generan con ello el fenómeno del geo-dinamismo torrencial.

Originariamente las avenidas del arroyo del Partido se expandían antes de llegar a la marisma del Parque Nacional de Doñana (PND), generando una serie de ramificaciones o rebosaderos

de escaso calado, sin capacidad para provocar tensiones de tracción, que pudieran vencer la resistencia a iniciar el movimiento de las arenas que conformaban sus lechos, e incluso favoreciendo el depósito de los sedimentos que arrastraba la corriente, generándose de este modo el primitivo cono de sedimentación. Transcurridas las avenidas, el flujo, laminado y desprovisto de sedimentos, se concentraba en varios canales de desagüe de dicho cono de sedimentación, descargando a la marisma en régimen uniforme. Los terrenos de este cono sólo se cultivaban en los años en los que las avenidas del invierno anterior lo inundaban, manteniéndose los restantes años como erial o pastos. El Plan Almonte-Marismas puso en cultivo toda esta superficie en 1981, para lo que se encauzó el arroyo del Partido en sus últimos 7 Kilómetros anteriores a su afluencia en la marisma.

La canalización modificó de forma sustancial la circulación de los flujos en los momentos de avenidas forzando a su concentración; de este modo el primitivo cono de sedimentación del arroyo pasó a comportarse como una prolongación de su garganta y al descargar finalmente las avenidas en la marisma terminaron generando en ésta un nuevo cono de sedimentación; a causa de la expansión de la corriente y el consiguiente depósito de la carga sólida que hasta entonces llevaban incorporada. Estudiando la expansión del nuevo cono de sedimentación sobre fotografías aéreas de diferentes fechas (delimitación de la superficie del nuevo cono en las mismas y traslado de dicha información a un SIG para su correcta identificación, ubicación y medición), junto con dos campañas de trabajos topográficos de campo, la primera realizada entre 1997-99 y la segunda en 2003, para la determinación de las coordenadas altimétricas; se estimaron los incrementos en superficie y volumen del nuevo cono de sedimentación dentro de la marisma del PND en el periodo analizado (Tabla 1).

Tabla 1.- Estimación de los incrementos en superficie y volumen del nuevo cono de sedimentación del arroyo del Partido sobre la marisma del PND entre 1956-2003.

Año	Superficie (m²)	Volumen (m³)
1956	0	0
1982	152.241	5.338
1985	292.142	19.657
1993	1.042.800	250.460
1996	2.035.211	954.017
1997	3.325.798	2.547.588
1998	3.814.778	3.733.575
2000	3.929.143	3.899.220
2001	3.979.757	3.973.527
2002	4.195.430	4.297.024
2003	4.314.186	4.479.898

Ante esta situación y tras su análisis, se propusieron las siguientes acciones para tratar de recuperar el régimen hidrológico primitivo del arroyo del Partido: **1)** Construir en una sección del arroyo, situada al inicio de su primitivo cono de sedimentación, a unos 6 Km. de su afluencia a la marisma del PND, un dique de cierre para controlar la erosión remontante aguas arriba del mismo; **2)** Permitir expansionarse a la corriente del arroyo del Partido durante las avenidas, a partir de la sección donde se ubica el dique anterior y aguas abajo del mismo; para recuperar parte de su antigua llanura de inundación. Por razones técnicas y socio-económicas, se dispuso que la superficie proyectada para inundación-laminación-sedimentación se estableciera en el margen izquierdo de la canalización, aguas abajo del dique en cuestión.

En el proyecto definitivo el área destinada a expansión de la corriente aguas abajo del dique se protegió en algunas zonas de su perímetro por muros y, además, dado que la misma presenta una pendiente hacia otro arroyo menor, llamado Cañada del Pinar, se construyó

sobre éste otro dique, para regular las avenidas y retornar el flujo sobrante de la regulación hacia el área destinada a inundación-laminación. Este proyecto, que se ejecutó en el verano de 2006, constituye la *Actuación núm. 3* de otro proyecto mayor destinado a la *Regeneración Hidrica de la Marisma del PND* conocido como **Proyecto Doñana 2005** que, debido a su monto económico y a su impacto medioambiental, dispuso desde su inicio de una Comisión Ejecutiva y otra Comisión Científica para su *Seguimiento*. Lo que se expone a continuación son los trabajos de *Seguimiento* de la *Actuación núm. 3*.

OBJETIVOS

El objetivo del proyecto de restauración del tramo final del arroyo del Partido es la regeneración hidráulica e hidrológica del mismo, es decir, de los siete Km. anteriores a su afluencia en la marisma del PND. Ello obliga en primer lugar establecer un *Sistema de Control de las futuras Avenidas* que tengan lugar en el arroyo del Partido; como paso previo para regular la corriente que finalmente afluye en la marisma en tales situaciones y, consecuentemente, implica la necesidad de establecer una nueva superficie de inundación-laminación-sedimentación en el área que con anterioridad a 1981 se extendía el primitivo cono de sedimentación del citado arroyo, o al menos en una parte de la misma.

Asentada dicha superficie y asegurado que la misma cumple con las funciones de inundación-laminación-sedimentación; el tramo final del arroyo del Partido entra en su fase de restauración; porque se detiene el crecimiento del cono de sedimentación generado en la marisma del PND; se inicia la formación de un nuevo cono en el área destinada a tal fin y es posible recomponer los antiguos canales de desagüe, para que el flujo de las avenidas del arroyo del Partido descargue en la marisma en régimen uniforme, tras ser laminado y desprovisto de su caudal sólido en el área destinada al efecto con la *Actuación núm. 3*.

METODOLOGÍA

El comportamiento de los cursos torrenciales es aleatorio, al ser aleatorios los principales factores que lo condicionan; por ello todo proyecto de restauración de estos cursos, como es el caso del arroyo del Partido, debe asumir un *Seguimiento* y plantearse tanto a corto como a largo plazo.

Para ello se requiere establecer una situación de partida del área objeto del *Seguimiento*, que en el caso que nos ocupa, se optó por la que ésta presentaba en julio de 2003, cuando finalizaron trabajos topográficos efectuados sobre el terreno, previos a la ejecución de las obras de la *Actuación núm. 3*. En dicha fecha se disponía de una información completa topográfica y temática del área en cuestión y del comportamiento geo-torrenciales del arroyo del Partido en ella durante el periodo 1995-2003 (avenidas ocurridas; sus caudales; la emisión por éstos de sedimentos a la marisma, tanto en suspensión como en carga de fondo, y el avance del nuevo cono de sedimentación en la marisma (Tabla 1). El seguimiento a largo plazo implica una investigación, que establezca un nivel de información semejante del área afectada pasado un periodo lo suficiente largo desde la ejecución de las obras de la *Actuación núm. 3*, que tuvo lugar en el verano de 2006; mientras que el seguimiento a corto plazo recomienda seguir el comportamiento de las obras ante las avenidas que ocurran en el arroyo del Partido a partir de su ejecución; para detectar las posibles desviaciones funcionales de las

mismas respecto de lo previsto inicialmente en el proyecto y proponer rectificaciones pertinentes al diseño inicial, a fin de adecuarlo a la dinámica geo-torrencial del curso a corregir, en consonancia con los objetivos previos adoptados en el proyecto. Esta comunicación se refiere a este último y expone los trabajos de su *Seguimiento* llevados a cabo en el periodo 2006-09.

RESULTADOS: OBRAS EJECUTADAS Y MEDIDAS PERTINENTES ADOPTADAS SEGÚN LO PROYECTADO EN LA ACTUACIÓN NÚM. 3 DEL PROYECTO DOÑANA 2005

A corto plazo el plan restaurador diseñado para el arroyo del Partido se identifica con su *Sistema de Control para sus futuras Avenidas*. Con este objetivo se realizaron las obras pertinentes y se destinaron al servicio del proyecto las superficies necesarias. Sintetizando, las operaciones esenciales se concretan en las siguientes: **a)** un dique construido sobre el propio arroyo del Partido al inicio de su primitivo cono de sedimentación (en adelante DIQUE 1), que además de controlar la erosión remontante aguas arriba del mismo, actúa como elemento director del esquema restaurador del arroyo del Partido, es decir, de la *Actuación núm. 3*; **b)** un espacio disponible para inundación-laminación-sedimentación planificado en la *Actuación núm. 3* con este propósito y **c)** un segundo dique (en adelante DIQUE 2) sobre el arroyo de la Cañada del Pinar, citado anteriormente. La comprensión del esquema obliga a extenderse en algunos detalles del comportamiento del arroyo del Partido en el paraje objeto de la reconstrucción, lo que se aborda a continuación.

En el pasado anterior al encauzamiento del arroyo del Partido (1981), éste iniciaba su primitivo cono de sedimentación en el entorno donde se ha construido el DIQUE 1 (2006). A partir de dicha sección el flujo de las avenidas que tenían lugar en el arroyo se expandía por una gran superficie y divagaba por ella; pero siempre se mantenía un pequeño canal principal en el que, pasado el efecto de las avenidas, se concentrara una parte de la corriente, que descargaba a la marisma laminada y desprovista de sedimentos en un paraje próximo a un núcleo de población conocido como la aldea de El Rocío (donde tiene lugar anualmente una de las romerías más celebradas del país) bordeando por el este al mismo. El citado pequeño canal principal era realmente el genuino canal de desagüe del cono de sedimentación del arroyo del Partido, recibía el nombre de caño Ajolí y tenía una sección de evacuación máxima de unos $5 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$. Tras la canalización del tramo final del arroyo del Partido, las avenidas del mismo en el periodo 1982-2003 aterraron por completo el caño Ajolí, al tiempo que formaban en la marisma del PND, concretamente en el paraje que se conoce como marisma de El Rocío, el nuevo cono de sedimentación (el actual) del mencionado arroyo.

En el área objeto de la restauración, junto al arroyo del Partido circula otro arroyo, el de la Cañada del Pinar, que tiene su propia cuenca, aunque en situaciones de avenida del arroyo del Partido los caudales de éste pueden invadir el cauce del arroyo de la Cañada del Pinar en el paraje donde se iniciaba la formación del primitivo cono de sedimentación del Partido. Dicha zona se corresponde con el vértice de la superficie triangular que aparece en la fotografía aérea de 2003 que se muestra en la Figura 1. En la misma el curso que drena por la izquierda y que está señalado con una traza naranja es el arroyo del Partido; el que circula por la derecha, señalado con una traza verde, es el arroyo de la Cañada del Pinar y en la parte inferior de la fotografía se muestra, en azul, el trazado de un camino asfaltado de oeste a este, que une dos núcleos de población de la zona, El Rocío y Villamanrique de la Condesa. La superficie comprendida entre ambos arroyos era parte del antiguo cono de sedimentación del

arroyo del Partido hasta su canalización en 1981 y con la *Actuación núm. 3* se pretende recuperarlo nuevamente para tal fin.

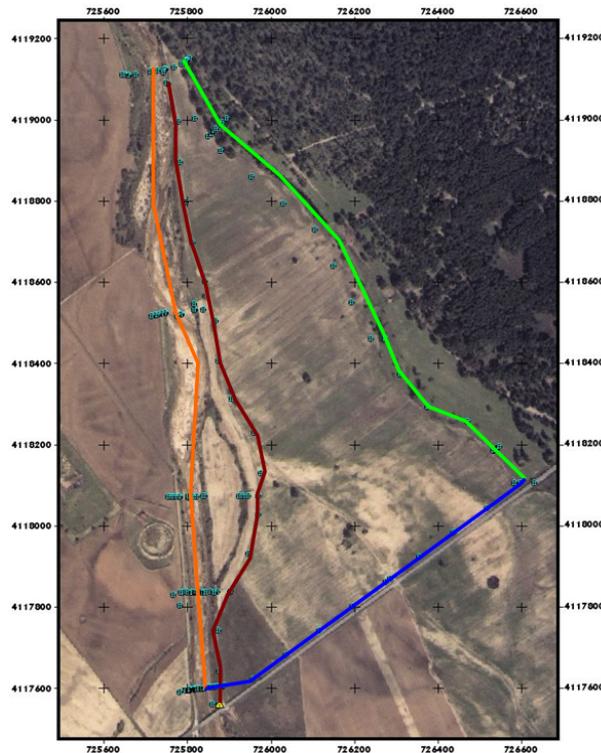


Figura1.- Superficie de inundación-laminación-sedimentación establecida en la *Actuación núm. 3 del Proyecto Doñana 2005* como parte del plan de restauración del tramo final del arroyo del Partido, sobre una fotografía aérea de la misma de 2003. En ella el arroyo del Partido aparece señalada con una traza naranja; el arroyo de la Cañada del Pinar con una traza verde y el camino asfaltado que une las poblaciones de El Rocío (situada al oeste) y Villamanrique de la Condesa (ubicada al este) en azul. El triángulo amarillo del extremo inferior de la fotografía es el clavo topográfico J10 de coordenadas conocidas UTM-USO 29-ED50 ($x = 725880,3440$; $y = 4117558,3206$; $z = 16,3725$), por haber sido establecido en un proyecto anterior, que se ha utilizado de referencia en todas las operaciones topográficas del presente Seguimiento efectuadas en la superficie en cuestión.

La superficie que aparece en la fotografía de la Figura 1 tiene su pendiente dirigida hacia el arroyo de la Cañada del Pinar; esta circunstancia condicionaba en el pasado a este arroyo a comportarse como un desaguadero adicional de las inundaciones causadas por las avenidas del arroyo del Partido en el área que se comenta. También se señala que la superficie del primitivo cono de sedimentación del arroyo del Partido se extendía a derecha e izquierda de la canalización de 1981, pero el plan restaurador de la *Actuación núm. 3* limita la superficie de inundación al margen izquierdo del mismo por cuestiones socio-económicas; lo que exige una mayor atención en el diseño de las actuaciones iniciales y en los posteriores trabajos de rectificación establecidos a través del *Seguimiento*. A continuación se describen: **a)** el DIQUE 1, construido sobre el arroyo del Partido; **b)** la superficie de inundación-laminación-sedimentación establecida en la *Actuación núm. 3* y **c)** el DIQUE 2, levantado sobre el arroyo de la Cañada del Pinar.

a) DIQUE 1 construido en el arroyo del Partido

Está constituido por un azud transversal al cauce de 2,6 m de altura sobre el lecho actual del arroyo. Inicialmente sobre él se estableció un vertedero con una base de 70 m de longitud y 2 m de anchura en coronación, situado a una cota media de 16,7 m. El vertedero tiene una altura de 2 m. El paramento del azud está atravesado por 31 mechinales de 0,3 m de diámetro, que

drenan el volumen embalsado por la obra, dispuestos en dos filas de 15 y uno de fondo (Figura 2, fotografías superiores y Figura 3, alzado del DIQUE 1 en el año 2006).



Figura 2. DIQUE 1 construido en el arroyo del Partido al inicio de su antiguo cono de sedimentación, que constituye el elemento director del esquema restaurador del arroyo adoptado en la *Actuación núm. 3 del Proyecto Doñana 2005*. *Fotografías superiores:* vertedero frontal, con el perfil original de 2006, visto desde aguas arriba (izquierda) y desde aguas abajo (derecha). *Fotografías inferiores:* Vertedero lateral del dique, detalle (izquierda) y panorámica desde aguas arriba (al fondo de la imagen derecha)

Aguas arriba de la estructura, sobre el margen izquierdo del cauce, se sitúa un vertedero lateral de 140 m de longitud, establecido sobre el propio margen de arena y revestido con escollera y una capa de hormigón ciclópeo, para evitar erosiones en el momento de vertido hacia la llanura de inundación-laminación-sedimentación, situada tras el citado margen. Su cota oscila algo, debido a su longitud y rusticidad, entre los valores 16,60 y 16,77 m. (Figura 2, fotografías inferiores y Figura 4, vista del DIQUE 1 en planta).

El DIQUE 1, junto al objetivo de controlar la erosión remontante en el lecho del arroyo del Partido en su paramento de aguas arriba, tiene también la misión de conseguir que una parte del caudal de avenida que llega hasta el mismo, se desvíe hacia el área de inundación-sedimentación proyectada en la *Actuación núm. 3* (Figuras 1) y se expanda por ella. Para ello se le ha dotado al dique de dos vertederos: el frontal (señalado en rojo en la Figura 4) que vierte directamente al cauce del arroyo del Partido y el lateral (señalado en azul en la Figura 4), que desvía el caudal restante hacia el área de inundación-sedimentación. El diseño de su vertedero frontal es especialmente importante, pues regula el caudal que pasa directamente al cauce del arroyo del Partido, que es el que condiciona: *a)* la detención o no del nuevo cono de sedimentación formado sobre la marisma del PND y *b)* la existencia o no de problemas por inundaciones y sedimentaciones al este de la aldea de El Rocío.

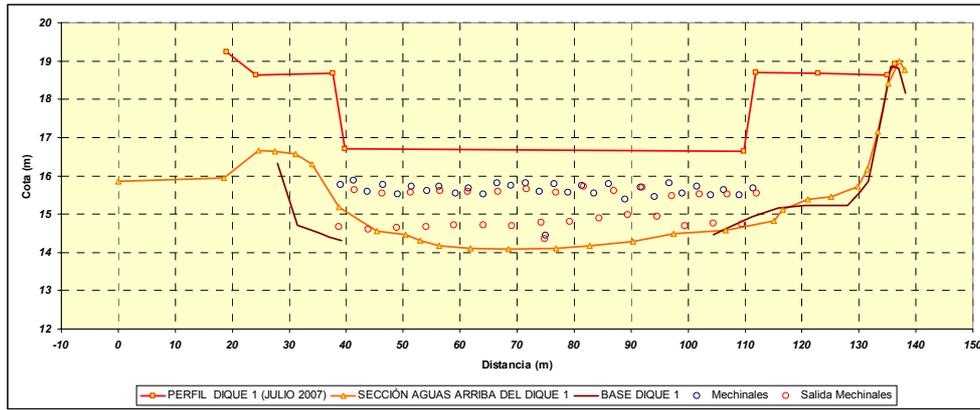


Figura 3. Representación en alzado del DIQUE 1 construido en el arroyo del Partido (2006) al inicio de su antiguo cono de sedimentación, visto desde aguas arriba (en rojo). También se representan: **a)** el perfil de una sección transversal al cauce levantado aguas arriba del dique (en naranja), cuyo margen izquierdo establece la cota de su vertedero lateral; **b)** el nivel del terreno o de la sedimentación en la base del paramento aguas arriba del dique en noviembre de 2007 (en marrón). En relación con los mechinales: los círculos azules corresponden a entrada de flujo y los círculos rojos a salidas de flujo



Figura 4. Vista en planta del dique construido en el arroyo del Partido aguas abajo de la casa de la Matanza sobre una fotografía aérea de agosto de 2008 (con el perfil de su vertedero frontal original de 2006). Sobre el mismo aparecen los puntos obtenidos con los diferentes levantamientos topográficos realizados en el propio dique y su entorno en los años 2007 (con una estación total, en azul) y 2008 (con un DGPS, en verde). También aparecen: **a)** la línea roja que muestra la posición del vertedero frontal del dique; **b)** la línea azul que define al vertedero lateral del mismo; **c)** la curva en marrón que representa el perfil del terreno en el área de inundación-sedimentación, inmediatamente aguas abajo del vertedero lateral; **d)** la línea en naranja que establece el perfil levantado a una sección del cauce, aguas arriba del dique; **e)** la línea en verde oscuro que representa la dirección de la nueva mota construida en el margen izquierdo del arroyo del Partido, aguas abajo del dique, para separar la superficie de inundación-sedimentación del cauce del arroyo.

b) Espacio disponible para inundación-laminación-sedimentación planificado con la Actuación núm. 3

Se trata de una superficie que está disponible para inundarse en situaciones de avenidas en el arroyo del Partido, proyectada en la *Actuación núm. 3* aguas abajo del DIQUE 1 para tal fin (Figura 1). Su objetivo es permitir que la corriente experimente durante las avenidas los mismos procesos de expansión, inundación, laminación y sedimentación que lo hacía en el pasado anterior al encauzamiento del arroyo, antes de afluir laminada y desprovista de sedimentos a la marisma; por tanto, constituye un elemento esencial en el proyecto. El previsible comportamiento geomorfológico de la solera de esta superficie de inundación, ante el paso por ella de los caudales de avenida descargados a la misma través del vertedero lateral del DIQUE 1, en dirección al arroyo de la Cañada del Pinar siguiendo el gradiente del terreno en el lugar, representó una de las preocupaciones más serias del proyecto; ante la posibilidad de que pudiera producirse un desplazamiento masivo de la corriente, lo que llegó a condicionar su redacción.

Como tal comportamiento no era posible conocerlo a priori; en el esquema inicial del proyecto se optó por una solución conservadora. Se estableció el reparto de los caudales entre los dos vertederos del DIQUE 1 con criterios de ingeniería hidráulica y de prudencia respecto a la evolución previsible del terreno en el área de inundación-laminación. En este contexto, se consideró como caudal de proyecto la avenida de periodo de recurrencia de 100 años en el paramento aguas arriba del dique, que se estimó en $358 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$; adecuando el siguiente reparto para situaciones extraordinarias: $144 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ (el 40 % del caudal total) descargarían directamente por el vertedero frontal y por los mechinales del dique y el flujo restante $214 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ lo harían por el vertedero lateral hacia el área de inundación-laminación establecida en la *Actuación núm. 3*.

El área de inundación-laminación-sedimentación situada inmediatamente aguas abajo del vertedero lateral del DIQUE 1 y aguas arriba el camino asfaltado que une El Rocío con Villamanrique de la Condesa (Figuras 1, vista general sobre una fotografía aérea de septiembre de 2003; Figura 5, detalle sobre una fotografía aérea de agosto de 2008), al ser la más directamente afectada por la expansión de las avenidas del arroyo del Partido fue objeto de una nivelación geométrica de todo su perímetro (19-07-2003), para conocer con detalle su pendiente y plantear la medida a adoptar en el arroyo de la Cañada del Pinar, para que la lámina de inundación no sufriera un desplazamiento masivo desde el arroyo del Partido hacia el cauce de la Cañada del Pinar, por la existencia de un gradiente del terreno en esa dirección. La solución aportada fue el DIQUE 2, que se comenta en el epígrafe siguiente. Resumiendo se trata de una superficie de 57 ha, de forma triangular y comprendida entre los siguientes límites: al oeste (margen izquierdo del arroyo del Partido) por la nueva mota del propio encauzamiento del arroyo, que se prolonga hasta el camino asfaltado que une El Rocío con Villamanrique de la Condesa (Figura 7 en color verde); al este por el cauce del arroyo de la Cañada del Pinar; al sur por el tramo comprendido entre ambos arroyos del camino asfaltado anteriormente citado y, al norte, donde se sitúa el vértice del triángulo, es el lugar en el que los dos arroyos se encuentran más próximos, existiendo la posibilidad, en situaciones de avenidas en el arroyo del Partido, que su corriente invada el cauce del arroyo de la Cañada del Pinar.



Figura 5. Zona central del área de inundación-laminación-sedimentación asociada al reparto de caudales de avenida entre los arroyos del Partido y de la Cañada del Pinar y ubicada en el espacio comprendido entre ambos. En primer término destaca el camino que une El Rocío con Villamanrique, que en situaciones de avenidas su zona de cotas más bajas puede funcionar como umbral de vertido. También se aprecia el DIQUE 2 construido sobre el arroyo de la Cañada del Pinar, inmediatamente aguas arriba del puente sobre dicho arroyo del camino que se ha comentado (en la rotonda de la fotografía). A la izquierda de la fotografía se observa la nueva mota construida en el margen izquierdo del arroyo del Partido, desde la ubicación del DIQUE 1 hasta el mencionado camino-umbral de vertido. En el extremo superior izquierdo de la fotografía se aprecia el ala lateral izquierda del vertedero frontal del DIQUE 1 y su vertedero lateral en toda su longitud.

La Figura 6 aporta dos gráficos elaborados con los datos de la nivelación geométrica del 19-07-2003, que reflejan la situación en el área en cuestión en dicha fecha. El primero (Figura 6.a) muestra el perfil del terreno desde la cota del lecho del arroyo del Partido, aguas arriba del puente sobre el camino asfaltado entre El Rocío y Villamanrique de la Condesa, hasta la cota del lecho del arroyo de la Cañada del Pinar inmediatamente aguas arriba de dicho camino asfaltado. Esta nivelación se realizó sobre el terreno previstamente inundable situado aguas arriba del citado camino aunque próximo a él, pero no sobre el mismo. El segundo (Figura 6.b) indica las cotas de los lechos del arroyo del Partido y del arroyo de la Cañada del Pinar en los itinerarios recorridos por cada uno de ellos en el área en cuestión; así como el umbral que debía superar en julio de 2003 la corriente del arroyo del Partido, para desbordar el primitivo muro de la margen izquierda de su encauzamiento y alcanzar al área de inundación-sedimentación.

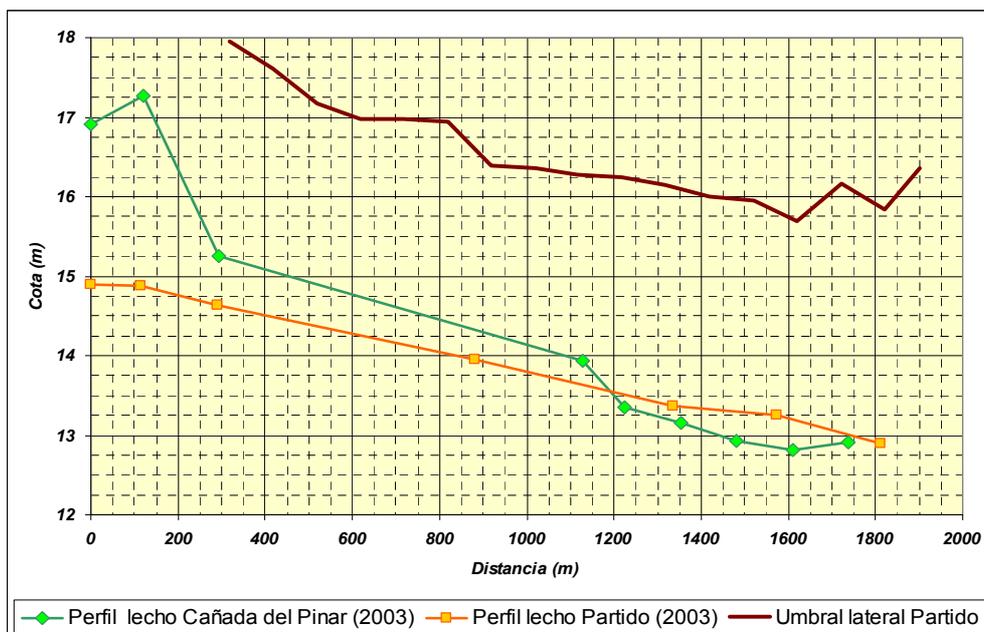
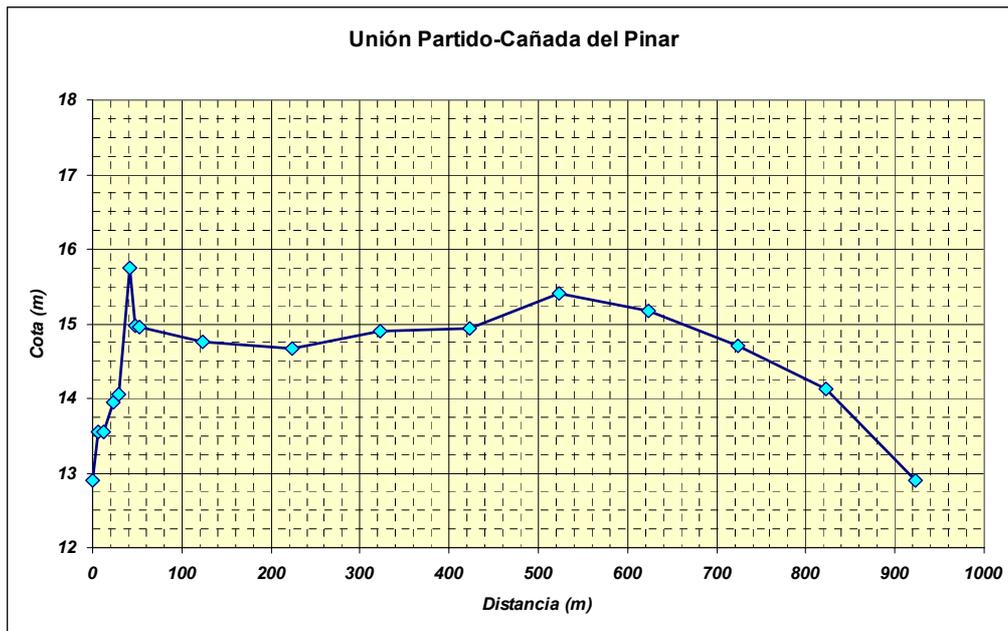


Figura 6. a) Esquema superior: Nivelación geométrica entre los lechos del arroyo del Partido y del arroyo de la Cañada del Pinar, siguiendo la dirección del camino asfaltado entre El Rocío-Villamanrique de la Condesa, pero apoyados en el terreno del área en cuestión y no sobre el camino (19-07-2003); **b)** Esquema inferior: Cotas de los arroyos del Partido y de la Cañada del Pinar en el área estudiada y el umbral a superar por la corriente del arroyo del Partido para desbordar al área de inundación-sedimentación en 2003.

En la fotografía aérea de la Figura 5 se observa que la superficie de inundación-laminación-sedimentación no termina en el camino asfaltado entre El Rocío y Villamanrique de la Condesa, sino que en situaciones de avenidas importantes en el arroyo del Partido (periodos de retorno > 100 años) éste puede convertirse en un umbral de vertido del agua almacenada aguas arriba (geográficamente al norte) hacia la llanura de inundación situada aguas abajo (al sur). Para conocer con precisión los tramos de vertido, la *Actuación núm. 3* previó realizar la nivelación geométrica de todo el camino asfaltado sobre su solera asfaltada (18-10-2008) en el intervalo comprendido entre el arroyo de la Cañada del Pinar y el arroyo del Partido;

concretamente entre los clavos topográficos **J33-J10-J33** (ida y vuelta) situados en sus extremos (en marrón en la Figura 7). La Figura 7 presenta el *Sistema de Control para sus futuras Avenidas del arroyo del Partido* ligado a dicha área.

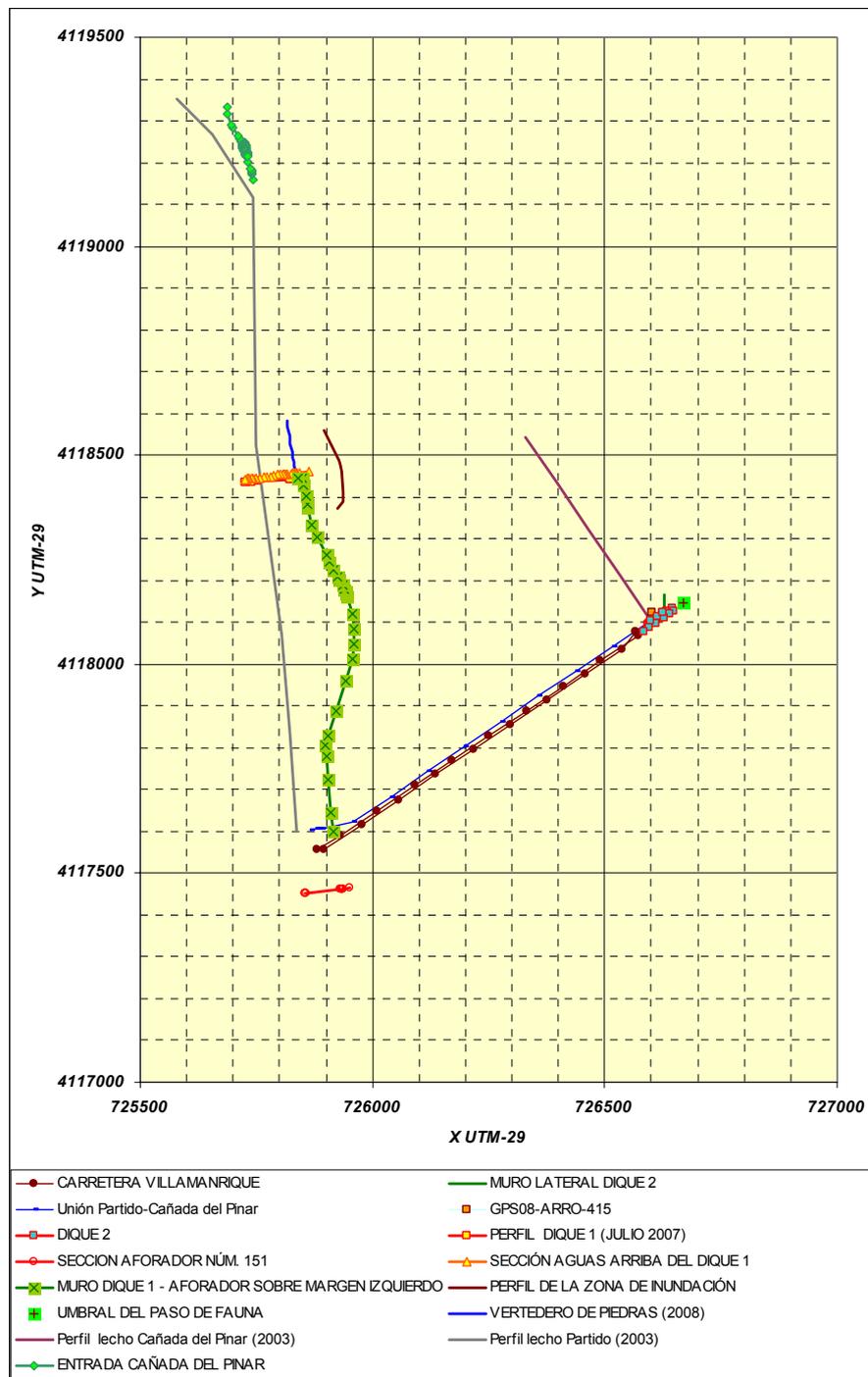


Figura 7. Representación del área de inundación situada entre los arroyos del Partido y de la Cañada del Pinar, aguas arriba del camino-umbral de vertido que une El Rocío con Villamanrique. En primer término las nivelaciones geométricas realizadas el 18-10-2008 (marrón) y el 17-07-2003 (azul) En el extremo derecho el DIQUE 2 (rojo con cuadrados azules) sobre el arroyo la Cañada del Pinar (morado). En el vértice inferior izquierdo el dique del aforador núm. 151 (en rojo) en el arroyo del Partido (gris). A la izquierda la nueva mota ente el camino-vertedero y el DIQUE 1 (en verde) y el propio DIQUE 1 sobre el arroyo del Partido (dique en rojo; perfil transversal al cauce aguas arriba del dique naranja con triángulos amarillos) y en el extremo superior sección del cauce del arroyo de la Cañada del Pinar que, en el caso de avenidas en el arroyo del Partido, puede recibir caudales trasvasados de éste último (en verde).

En consecuencia el área de inundación-laminación-sedimentación continúa aguas abajo del mencionado camino asfaltado ocupando una superficie de 227 ha. (Figura 8). La pendiente de esta superficie también se dirige hacia el arroyo de la Cañada del Pinar.



Figura 8. Izquierda: Superficie de inundación-laminación-sedimentación (227 ha.) ubicada aguas abajo del umbral de vertido del camino asfaltado entre El Rocío y Villamanrique de la Condesa, en el tramo comprendido entre el puente sobre el arroyo del Partido hasta el puente sobre el arroyo de la Cañada del Pinar. Derecha: Camino asfaltado entre El Rocío y Villamanrique de la Condesa, en el tramo mencionado que puede convertirse en umbral de vertido del volumen de agua almacenado aguas arriba del mismo.

c) DIQUE 2, situado en el arroyo de la Cañada del Pinar, aguas arriba del puente sobre el mismo del camino asfaltado entre El Rocío y Villamanrique

Para que sirva de elemento regulador del nivel de inundación en la superficie destinada a tal fin y que sólo una parte del flujo de avenida que entra en el área de inundación-sedimentación, procedente del vertedero lateral del DIQUE 1, descargue directamente al arroyo de la Cañada del Pinar, forzando al resto de la masa líquida a almacenarse aguas arriba del camino asfaltado entre El Rocío y Villamanrique de la Condesa, e incluso a rebasar el mismo si el nivel de almacenamiento lo obliga; se construyó en el cauce de la citado arroyo (2006), inmediatamente aguas arriba del puente sobre el mismo del mencionado camino asfaltado, un segundo azud, en adelante DIQUE 2 (Figuras 9 y 10).

El DIQUE 2 (Figuras 9 y 10 *a* y *b*) está constituido por un azud transversal al cauce de 1,5 m de altura. Sobre él se ubica un vertedero de 29,5 m de longitud y 3 m de anchura en coronación, situado a una cota media de 14,62 m. Aguas arriba de la estructura, sobre el margen izquierdo del cauce, existe un muro lateral de tierra de 15,70 m de cota para dirigir el flujo hacia el vertedero del dique y evitar que el agua se desvíe hacia el paso de fauna que se encuentra por debajo de la carretera a la izquierda de la obra. El paramento del azud está atravesado por 12 mechinales de 0,3 m de diámetro que drenan el volumen embalsado por la obra, dispuestos en dos filas de 6.

Con el DIQUE 2 estabiliza el calado de la inundación en el área destinada al efecto; contribuyendo con ello a que la corriente se desplace aguas abajo sin experimentar desviaciones masivas hacia el arroyo de la Cañada del Pinar y, además, contribuye a que la corriente aguas arriba del dique se mantenga en régimen lento.



Figura 9. *Fotografías superiores:* Vistas del dique construido en el arroyo de la Cañada del Pinar, inmediatamente aguas arriba del puente sobre el mismo del camino asfaltado entre El Rocío y Villamanrique. *Fotografías inferiores:* A la izquierda detalle de los muros laterales de hormigón que conforman el vertedero del dique. A la derecha la prolongación del muro de hormigón del vertedero por otro de tierra, para encauzar la corriente hacia el vertedero. Este muro de tierra evita que el agua pueda desviarse al paso de fauna situado por debajo de la carretera, a la izquierda de la obra.

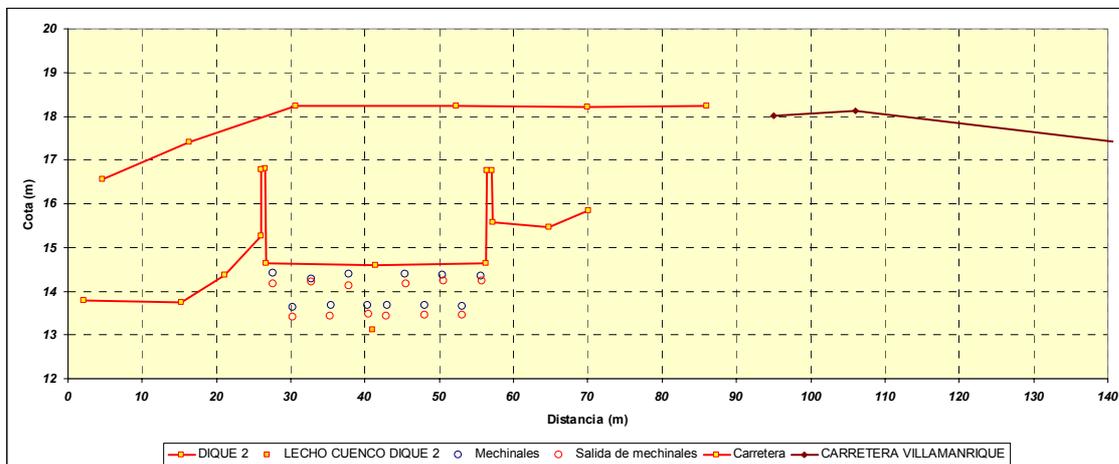


Figura 10.a. Representación en alzado del DIQUE 2 construido en el arroyo de la Cañada del Pinar (2006) inmediatamente aguas arriba del puente sobre el mismo del camino asfaltado entre El Rocío y Villamanrique, visto desde aguas abajo (en rojo). También se representan: **a)** el lecho del arroyo (cuadrado amarillo); **b)** el puente sobre el arroyo (en rojo); **c)** el camino asfaltado (en marrón). En relación con los mechinales: los círculos azules corresponden a entrada de flujo y los círculos rojos a las salidas.

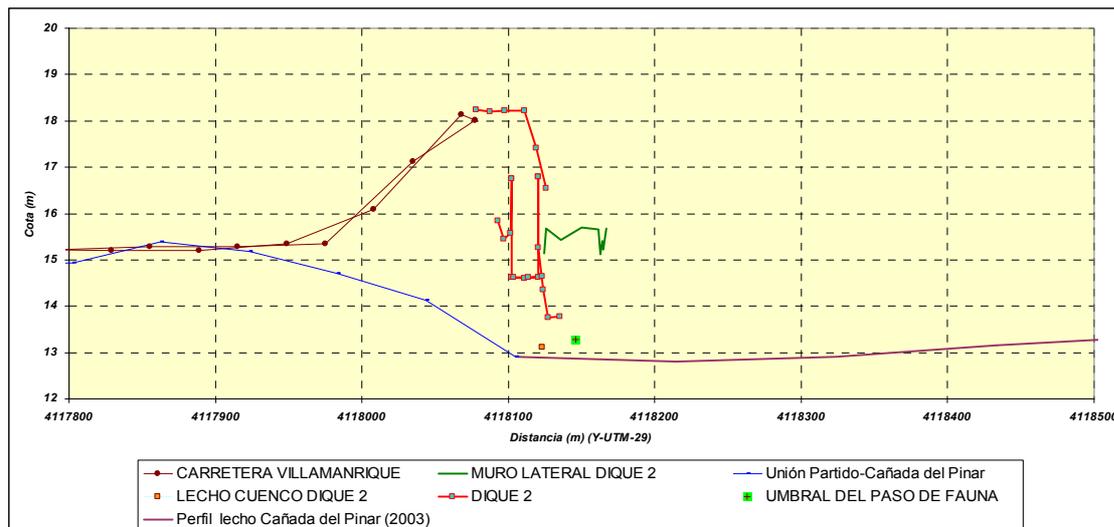


Figura 10.b. Representación en perfil del DIQUE 2 (en rojo), vista de este a oeste. También se representan: **a)** el puente sobre el arroyo (en rojo); **b)** el perfil del lecho del arroyo de la Cañada del Pinar, obtenido por nivelación geométrica 19-07-2003 (en violeta); **c)** la cota del lecho del arroyo tomado con el equipo DGPS en 2008 (cuadrado amarillo); **d)** el tramo final del perfil de la nivelación geométrica realizada entre los lechos del arroyo del Partido y del arroyo de la Cañada del Pinar el 19-07-2003 (en azul) **e)** los tramos inicial y final del perfil de la nivelación geométrica realizada el 18-10-2008 sobre el camino asfaltado entre El Rocío y Villamanrique (en marrón); **f)** el muro de tierra situado en el margen izquierdo del arroyo aguas arriba del DIQUE 2, que sirve para encauzar el flujo hacia su vertedero (en verde); **g)** el paso de fauna situado por debajo de la carretera a la izquierda de la obra (cruz sobre fondo verde).

ANÁLISIS DE LOS RESULTADOS: COMPORTAMIENTO DE LAS OBRAS EJECUTADAS Y DE LAS DISPOSICIONES ADOPTADAS CON DE LA ACTUACIÓN NÚM. 3 EN EL VERANO DE 2006. RECTIFICACIONES PROPUESTAS Y EFECTUADAS AL DISEÑO ORIGINAL DE LAS OBRAS

Tras concluir las obras y el resto de las disposiciones adoptadas con la *Actuación núm. 3* del **Proyecto Doñana 2005** en el verano de 2006; al año siguiente se inició su *Seguimiento*. Las dos primeras operaciones fueron: **1)** Situar topográficamente en el territorio escenario del proyecto la ubicación del DIQUE 1; del DIQUE 2 y de los límites de la superficie destinada a inundación-laminación-sedimentación. **2)** Calcular las *Curvas de Gasto en los Sistemas de Control de Avenidas* del arroyo del Partido establecidos con el DIQUE 1 y con el DIQUE 2.

Posicionamiento de los principales elementos del *Sistema de Control de Avenidas* del arroyo del Partido

Para esta operación se partió del clavo topográfico **J10** de coordenadas conocidas UTM-USO 29-ED50 ($x = 725880,3440$; $y = 4117558,3206$; $z = 16,3725$), que se representa con un triángulo amarillo en el extremo inferior de la Figura 1. Mediante nivelación topográfica se definió la cota altimétrica del clavo **J30**, que se instaló en el ala derecha del vertedero frontal del DIQUE 1 ($x = 725740,9004$; $y = 4118436,4820$; $z = 18,6860$), y a través de una nivelación geométrica se determinó la cota altimétrica del clavo **J33**, que se plantó en el puente del camino asfaltado entre El Rocío y Villamanrique a su paso sobre el arroyo de la Cañada del Pinar, inmediatamente aguas abajo del DIQUE 2 ($x = 726565,8460$; $y = 4118077,2098$; $z = 18,0150$). A partir del **J30** se definieron los restantes puntos representativos situados en el propio DIQUE 1 y en su entorno; mientras que desde el **J33** se establecieron los puntos significativos del DIQUE 2 y de sus alrededores. En las operaciones

topográficas efectuadas directamente sobre el terreno en la superficie objeto del Seguimiento, las coordenadas planimétricas (x, y) se obtuvieron utilizando un DGPS-Leica; pero las coordenadas altimétricas (z) se determinaron por nivelación en el caso de los clavos topográficos J30 y J33 y de los restantes puntos establecidos con las operaciones del año 2007 (puntos de color azul claro en la Figura 4); en los puntos determinados en el año 2008 (en color verde claro en la Figura 4) las cotas altimétricas correspondientes al elipsoide, obtenidas con el DGPS, se ajustaron a las del geoide a partir de la doble información disponible en los clavos topográficos.

Curvas de Gasto en los elementos del Sistema de Control de Avenidas del arroyo del Partido establecidos con el DIQUE 1 y con el DIQUE 2.

Tras la ejecución del DIQUE 1 según el planteamiento descrito (2006), se comprobó que el sistema de control establecido evitaba los problemas graves por inundaciones y deposiciones de sedimentos en el entorno oriental de la aldea de El Rocío, ante la ocurrencia de avenidas extraordinarias en el arroyo del Partido; pero no se solucionaba la estabilización del nuevo cono de sedimentación del arroyo instalado en la marisma, ni los problemas de inundaciones menores en el límite este de la aldea de El Rocío; porque aún llegaban caudales importantes hasta el entorno de dicha aldea incluso en avenidas ordinarias. Se requería, por tanto, realizar algunas rectificaciones al diseño inicial, para conseguir la estabilización definitiva del tramo final del arroyo del Partido anterior a su afluencia en la marisma de El Rocío. La cuestión no supone ninguna novedad tratándose de obras de corrección de cursos torrenciales; que tradicionalmente se plantean a partir de un esquema hidráulico razonado preliminar, acompañado de una actuación de corrección, a la que se le aplican las rectificaciones necesarias posteriormente, a modo de aproximaciones sucesivas, para adecuar el comportamiento de la actuación inicial ante los futuros fenómenos torrenciales de la zona, hasta conseguir el objetivo del proyecto. Por otra parte, durante las avenidas del arroyo del Partido, no se conseguía la inundación proyectada en el área destinada al efecto con la *Actuación núm. 3*. Ante estas circunstancias, como paso previo a las operaciones de rectificación en el DIQUE 1, se determinaron las *Curvas de Gasto Teóricas* en los *Sistemas de Control de Avenidas* del arroyo del Partido establecidos con el DIQUE 1 (Figura 11) y el DIQUE 2 (Figura 12).

Rectificaciones efectuadas en el DIQUE 1 y nuevas Curvas de Gasto en el Sistema de Control de Avenidas del arroyo del Partido establecido con el DIQUE 1

La rectificación planteada en el DIQUE 1, tras conocerse su comportamiento en las avenidas de los años hidrológicos 2006-07 y 2007-08, tenía por objetivo reducir en tales situaciones el caudal de paso directo al arroyo del Partido a través de su vertedero frontal; para lo que se efectuaron las siguientes operaciones: 1) Modificar el perfil inicial del vertedero frontal (2006), disminuyendo su superficie de desagüe; 2) Tapar por grava los mechinales del dique, para que durante la avenida se pudiera laminar la descarga a través de ellas. Con estas modificaciones, que estaban operativas para enero de 2009, el nuevo perfil del vertedero frontal del DIQUE 1 se transformó una sección trapezoidal centrado en el lecho del arroyo de 20 m en su base, 24 m en su coronación y manteniendo los 2 m de altura. Las Figuras 13 y 14 muestran la nueva imagen del DIQUE 1. Las nuevas Curvas de Gasto Teóricas en el Sistema de Control de Avenidas del arroyo del Partido establecido con el DIQUE 1 tras las rectificaciones realizadas en éste (operativas en enero de 2009) se muestran en la Figura 15.

Con la información de las curvas de gasto teóricas de las Figuras 11 y 15 se elaboró la Tabla 2, que resume la distribución teórica de los caudales de 50 m³•s⁻¹; 100 m³•s⁻¹; 200 m³•s⁻¹ y 350 m³•s⁻¹ en la sección de inicio del primitivo cono de sedimentación del arroyo del Partido, por las diferentes secciones de vertido del DIQUE 1 y el inicio de la Cañada del Pinar, en las situaciones anterior (2006) y posterior (2009) a las rectificaciones realizadas el dique.

Sin embargo, como se pudo comprobar durante las avenidas del invierno de 2008-09, en la práctica la operatividad de los mechinales nunca se suprime totalmente y, además, el DIQUE 1, debido a su ubicación en un lecho totalmente arenoso, presenta filtraciones en avenidas importantes, por lo que los valores de las filas 7 al 10 de la columna 3 de la Tabla 2 resultan por defecto; lo mismo que los caudales que vierten directamente al arroyo del Partido que se muestran en las curvas de las Figura 15.

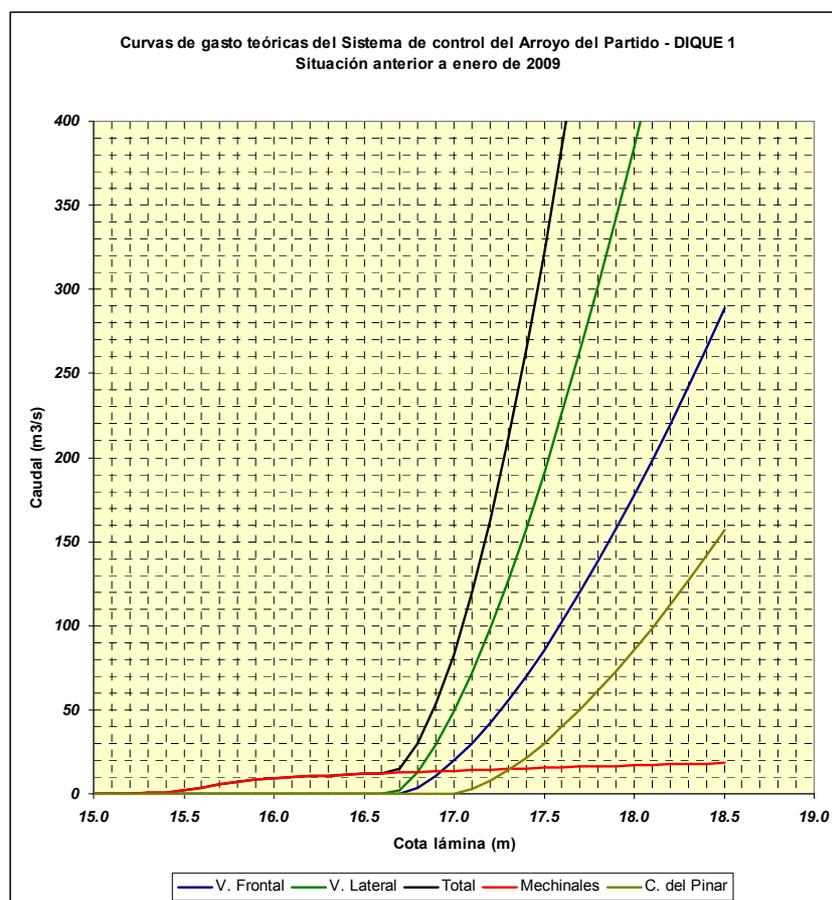


Figura 11. Distribución del caudal total (m³•s⁻¹) que pasa por la sección de inicio del primitivo cono de sedimentación del arroyo del Partido en el DIQUE 1, construido sobre dicho arroyo, entre sus diferentes secciones de vertido para la situación teórica del verano de 2006 (anterior a la rectificación de enero de 2009), con el vertedero frontal original y con los mechinales abiertos: Gasto por el vertedero frontal (azul); gasto por el vertedero lateral (verde); gasto total (negro); gasto a través de los mechinales (rojo); gasto al inicio del arroyo de la Cañada del Pinar aguas abajo del inicio del primitivo cono de sedimentación del arroyo del Partido (verde-pardo).

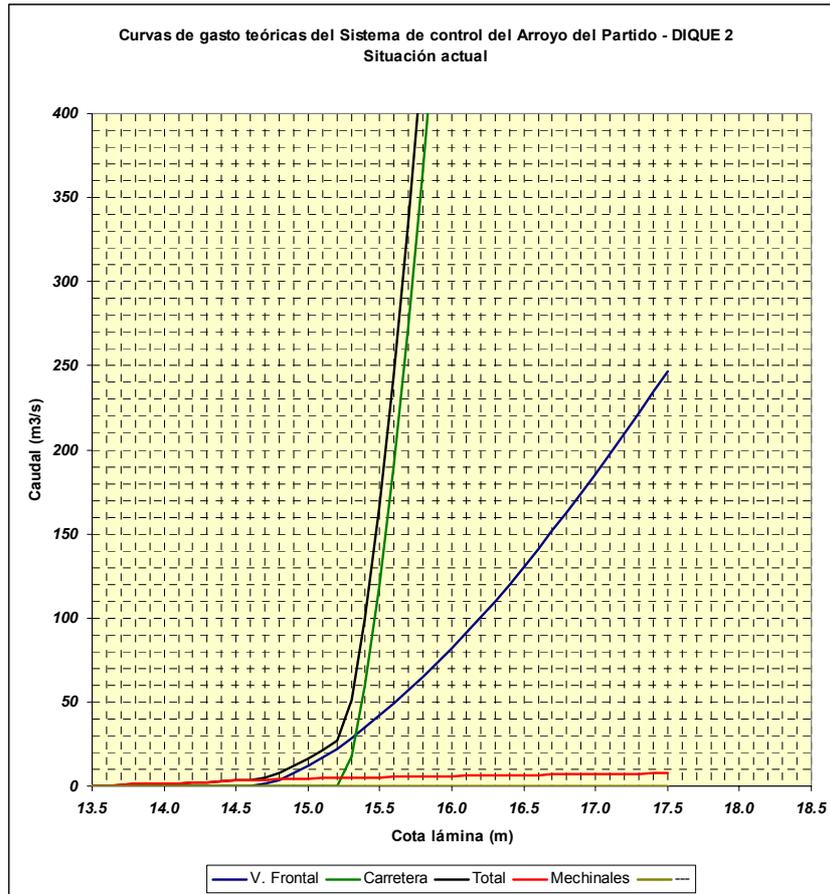


Figura 12. Distribución del caudal total ($\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$) que pasa por la sección de inicio del primitivo cono de sedimentación del arroyo del Partido en el DIQUE 2, construido en el arroyo de la Cañada del Pinar, entre sus diferentes secciones de vertido para su situación teórica actual (2006): gasto por el vertedero frontal (azul); gasto por el umbral del camino asfaltado que enlaza El Rocío con Villamanrique de la Condesa (verde); gasto total (negro); gasto a través de los mechinales (rojo).



Figura 13. DIQUE 1 tras la rectificación del perfil de su vertedero frontal, operativo en enero de 2009, a las 13:00 horas locales del día 2-02-2009, tras la avenida iniciada en la tarde-noche anterior (imagen cedida por C. Urdiales, PND).

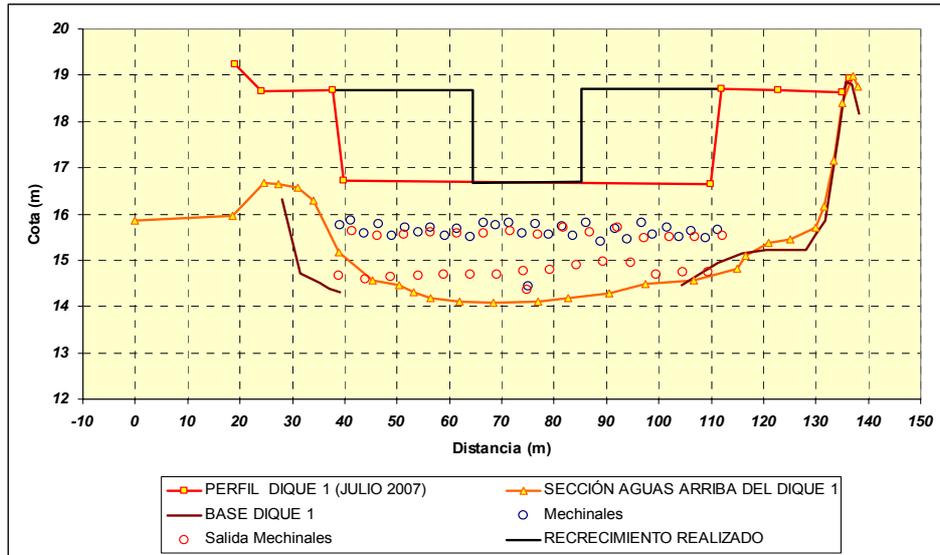


Figura 14. Alzado del DIQUE 1 con el diseño definitivo de su vertedero frontal, operativo en enero de 2009, que modifica la distribución de los caudales de avenida que llegan hasta su paramento aguas arriba y reduce el caudal que vierte directamente en el arroyo del Partido.

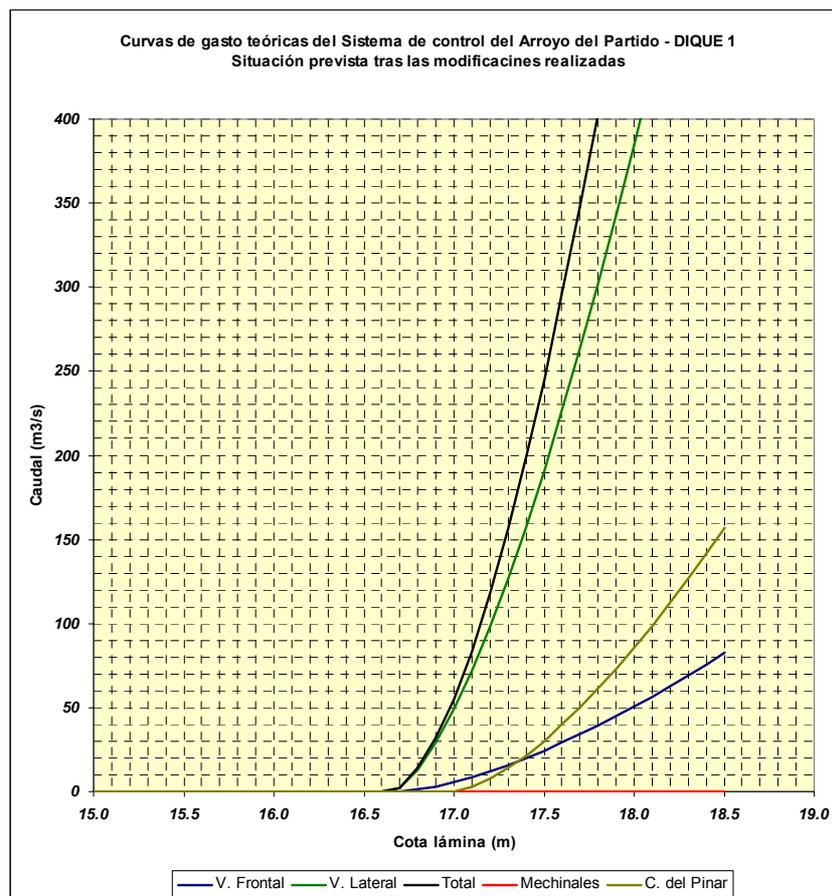


Figura 15. Distribución del caudal total ($m^3 \cdot s^{-1}$) que pasa por la sección de inicio del primitivo cono de sedimentación del arroyo del Partido en el DIQUE 1, construido sobre dicho arroyo, entre sus diferentes secciones de vertido, para la situación posterior a enero de 2009: Gasto por el vertedero frontal (azul); gasto por el vertedero lateral (verde); gasto total (negro); gasto a través de los mechinales (rojo); gasto por el inicio del arroyo de la Cañada del Pinar (verde-pardo).

Tabla 2. Distribución de los caudales de $50 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$; $100 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$; $200 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ y $350 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ en la sección de inicio del primitivo cono de sedimentación del arroyo del Partido, por las diferentes secciones de vertido del DIQUE 1 y el inicio de la Cañada del Pinar.

Escenario propuesto en el dique	Caudal del evento ($\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$)	Reparto de caudales por los diferentes elementos de vertido ($\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$)			
		Mechinales	Vertedero frontal	Vertedero lateral	Sección inicial de la C. Pinar
Situación de 2006; antes de modificar el vertedero frontal y de tapar los mechinales	50	15	10	25	-
	100	15	20	65	-
	200	15	50	120	15
	350	15	90	210	35
Situación de 2009; con el vertedero frontal modificado y los mechinales tapados	50	-	5	45	-
	100	-	5	90	5
	200	-	25	155	20
	350	-	60	250	40

Tras determinar las *Curvas de Gasto Teóricas* para el *Sistema de Control de Avenidas* del arroyo del Partido en el DIQUE 1, tanto para la situación inicial al finalizar la obra (2006) como después de efectuar en él los trabajos de rectificación; se planteó verificar el comportamiento del dique en cuestión durante dos de las avenidas más significativas ocurridas el 1 y 5 de febrero de 2009. El caudal máximo para el día 1-02-2006 se estimó en $85 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ y para el día 5-02-2009 en $70 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ (Figura 16). Ello ha obligado a replantear las curvas de gasto y la propia Tabla 2; pero ha demostrado la idoneidad del *Seguimiento* planteado.

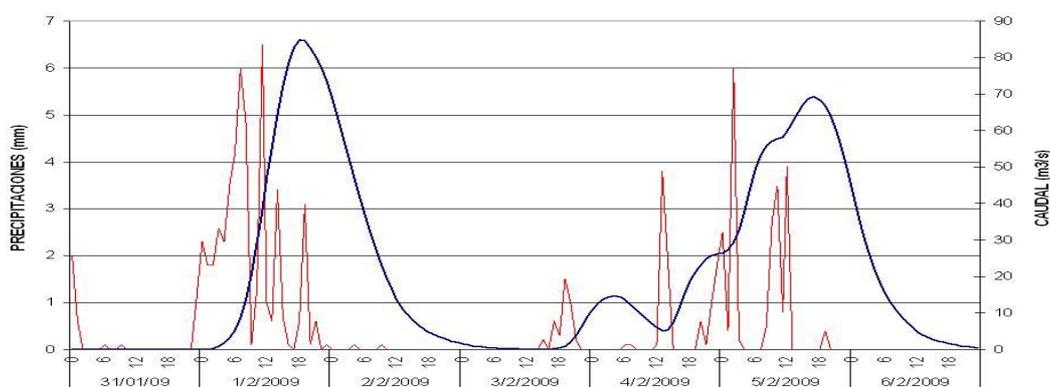


Figura 16. Precipitaciones torrenciales acaecidas en la estación de Bollullos (situada en el centro de la cuenca vertiente del arroyo del Partido) entre los días 31 de enero y 5 de febrero de 2009 (en rosa) y caudales máximos estimados en la sección del paramento aguas arriba del DIQUE 1 para los días 1 y 5 de febrero de 2009 (en azul).

Aunque el DIQUE 1 no tiene por el momento ni aparatos ni estructuras para medir el caudal que pasa por él (existe, no obstante, un antiguo aforador, CHG núm. 151, aguas abajo del mismo y se está construyendo otro aforador aguas arriba); se dispone de fotografías del paso de la avenida por la sección del dique para ambas avenidas; que se pueden comparar con los caudales estimados para los mismos momentos en el gráfico de la Figura 16. En el caso de la avenida iniciada en la tarde noche del 1-02-2009, la fotografía de la Figura 13 muestra su situación en el DIQUE 1 a las 13:00 horas locales del día 2-02-2009. Para esa hora en el hidrograma de avenida de la Figura 16 están pasando unos $15 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$, quizá algo menos, lo que se adecua a lo que se muestra en la fotografía, donde todos los mechinales están desaguando casi a tope y no existe circulación del flujo por el umbral del vertedero frontal del dique (en la

Tabla 2 se estima que el vertido máximo por los mechinales supone un caudal de $15 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$). Para la avenida del día 5-02-2009 se dispone de las fotografías de la Figura 17; en ellas se muestra el estado de la avenida del arroyo del Partido en el lugar donde se ubica el DIQUE 1 a las 13:10 horas locales del día del evento. Atendiendo al crecimiento del hidrograma de la avenida en la Figura 16, la descarga en el arroyo en ese momento podía estar en torno a los $65 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$. La fotografía de la izquierda muestra una panorámica del sistema de reparto de los caudales del arroyo del Partido entre los vertederos frontal y lateral del DIQUE 1. La fotografía de la derecha es un detalle de la anterior, acentuando el paso de la corriente por el vertedero frontal, en el que se estima que están descargando en ese momento unos $20 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ ($15 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ que pasan por los mechinales y $5 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ por el umbral del vertedero). El resto del caudal de la avenida $45 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ se deriva hacia la superficie de inundación-laminación sedimentación a través del vertedero lateral. Conviene aclarar que el tapado de los mechinales no surtió el efecto esperado en el caso de las avenidas que se analizan; porque la corriente de la primera avenida tuvo la energía suficiente para arrastrar la grava que los cubría a través del hueco de los propios mechinales; lo que sugiere la adopción de las medidas oportunas, como poner una rejilla en el paramento aguas arriba del dique, para evitar que este efecto suceda en posteriores avenidas.



Figura 17. Estado de la avenida del arroyo del Partido en el DIQUE 1 a las 13:10 horas locales del día 5-02-2009. Atendiendo al crecimiento del hidrograma de la avenida de la Figura 16, la descarga en el arroyo del Partido en ese momento podía estar en torno a los $65 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$. La fotografía de la izquierda muestra una panorámica del sistema de reparto de los caudales del arroyo del Partido entre los vertederos frontal y lateral del DIQUE 1. La fotografía de la derecha es un detalle de la anterior, acentuando el paso de la corriente por el vertedero frontal, por el que se estima que están descargando en el momento de la fotografía unos $20 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ ($15 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ que pasan por los mechinales y el resto por el umbral del vertedero).
Fotografías C. Urdiales.

El procedimiento utilizado no es estrictamente científico, pues no existen mediciones en el propio DIQUE 1 para corroborar los supuestos aceptados; pero resulta útil y responde al criterio de las aproximaciones sucesivas para establecer la sección más conveniente que debe adoptar el vertedero frontal del dique en cuestión. Además no es incompatible con que en el futuro se instalen dispositivos de medida en el mismo.

Tratando de simular el comportamiento del DIQUE 1 ante futuras avenidas, admitiendo que se coloquen rejillas para taponar los mechinales en el paramento aguas arriba del mismo, para impedir que la corriente pueda arrastrar la grava a través de los mechinales; aún sigue resultando poco probable que no circule absolutamente nada de flujo a través de los mismos en caso de avenidas, como se estable en la Figura 15 y en columna 3, filas 7-10 de la Tabla 2. Para reflejar este efecto en las estimaciones de las nuevas Curvas de Gasto Teóricas en el

Sistema de Control del DIQUE 1, se ha asumido que el tapado con grava de los mechinales no supone que desaparezca el vertido a través de ellos (o que se retrase hasta que haya pasado la avenida), sino que únicamente se reduce el paso del caudal, porque la rejilla y la grava limitan la sección de vertido; estimando dicha disminución mediante la reducción del diámetro de los mechinales a 20 cm., con ello se pretende asumir también el efecto de la filtración que se experimenta por debajo de la obra durante las avenidas importantes. La nueva simulación de las curvas de gasto se muestra en la Figuras 18; aunque también se debe contemplar que, conforme se consolide el aterramiento aguas arriba del DIQUE 1, irá disminuyendo el paso del flujo por sus mechinales durante las avenidas, aunque nunca se reducirá por completo. En cualquier caso, los mechinales son un elemento muy importante en esta obra; porque no sólo representan un factor estructural, sino también contribuyen al mantenimiento de los caudales ecológicos durante los periodos de estiaje. A continuación, atendiendo a los resultados que aportan las nuevas curvas de gasto (gráficos de las Figuras 18) se ha elaborado la Tabla 3.

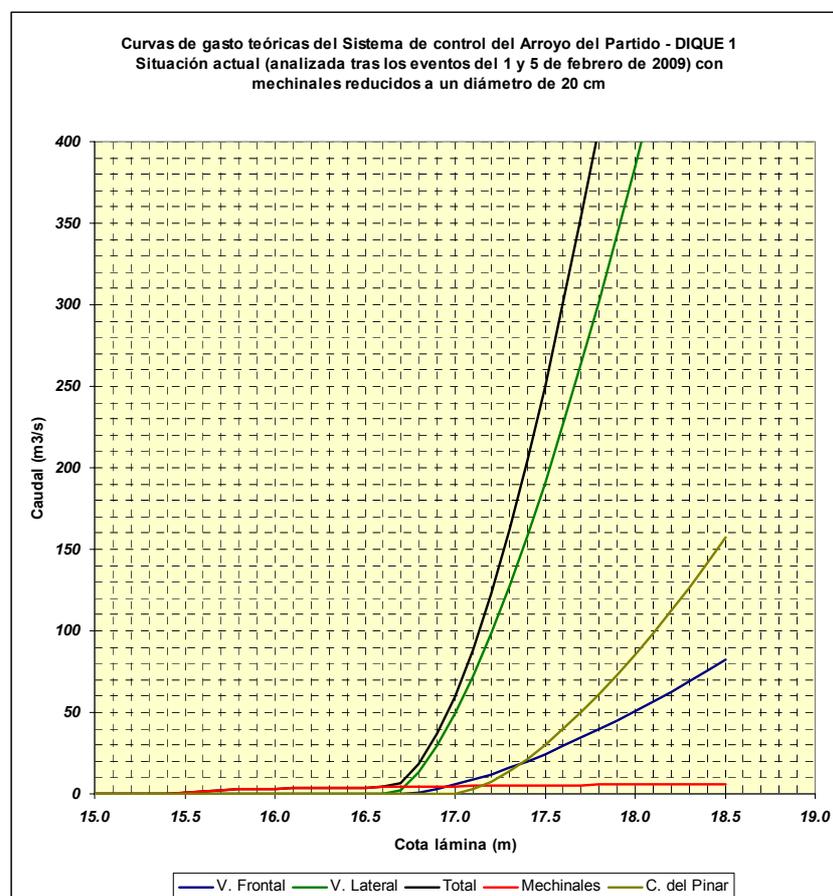


Figura 18. Distribución del caudal total ($m^3 \cdot s^{-1}$) que pasa por la sección de inicio del primitivo cono de sedimentación del arroyo del Partido en el DIQUE 1, construido sobre dicho arroyo, entre sus diferentes secciones de vertido, para la situación establecida con el perfil frontal modificado según el diseño de la Figura 13 y con los mechinales tapados con grava, pero parcialmente operativos: Gasto por el vertedero frontal (azul); gasto por el vertedero lateral (verde); gasto total (negro); gasto a través de los mechinales (rojo); gasto por el inicio del arroyo de la Cañada del Pinar aguas abajo del inicio del primitivo cono de sedimentación del arroyo del Partido (verde-pardo).

Tabla 3. Distribución de los caudales de $20 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$; $50 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$; $70 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ y $85 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ (estos dos últimos son los estimados para los días 5 y 1 de febrero de 2009); $100 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$; $200 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ y $350 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$, que pasan por la sección de inicio del primitivo cono de sedimentación del arroyo del Partido, en el DIQUE 1 y el inicio de la Cañada del Pinar. Se asume que el DIQUE 1 tiene el perfil de su vertedero frontal modificado y sus mechinales están tapados con grava, pero están parcialmente operativos.

Escenario propuesto en el DIQUE 1	Caudal del evento ($\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$)	Reparto de caudales por los diferentes elementos de vertido ($\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$)			
		Mechinales	Vertedero frontal	Vertedero lateral	Sección inicial de la C. Pinar
El dique con el perfil de su vertedero frontal modificado (enero 2009) y mechinales tapados con grava, pero parcialmente operativos	20^{*1}	4	2	14	
	50	5	5	40	
	70^{*2}	5	6	59	-
	85^{*3}	5	9	68	3
	100	5	10	80	5
	200	5	20	155	20
350	5	35	260	50	

*1 Situación en la que se supone que prácticamente todo el caudal de vertido al arroyo del Partido pasa por los mechinales y su valor $4 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ equivale al de llenado del caño final del arroyo del Partido, inmediatamente anterior a su afluencia en la marisma. (Figura 22)

*2 Situación previsible de la avenida del día 5-02-2009.

*3 Situación previsible de la avenida del día 1-02-2009.

En la Tabla 3 se muestra el reparto del flujo en el sistema definido por el DIQUE 1 para los caudales de referencia establecidos en la Tabla 2 en el paramento aguas arriba del dique. A ellos se han añadido los caudales de las avenidas de los días 1 y 5 de febrero de 2009 en la misma sección (Figura 16). También se ha incorporado el caudal de avenida de $20 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$; porque en la práctica representa un caudal cuya lámina de agua supera ligeramente el enrase en el umbral del vertedero frontal, por lo que casi en su totalidad pasa por los mechinales, para el supuesto que éstos están taponados con grava.

Un aspecto extraordinariamente importante del análisis de las avenidas de los días 1 y 5 de febrero de 2009, fue verificar el comportamiento de la solera de la superficie destinada en la Actuación núm. 3 para inundación-laminación-sedimentación, ante el paso por la misma de dichas avenidas. El levantamiento topográfico realizado al área que se comenta el 6-06-2009, permitió detectar que los caudales de las mencionadas avenidas, tras su paso por el vertedero lateral del DIQUE 1, se adaptaron a la micro-topografía de los antiguos derramaderos existentes en el lugar y que sólo causaron pequeñas erosiones por abrasión al pie del vertedero lateral del DIQUE 1; asimismo aparecieron arenas procedentes de deposición en una pequeña sección de su recorrido. Las imágenes de las fotografías tomadas por el equipo de Urdiales del PND en ambas fechas (Figura 19) y los resultados del levantamiento topográfico realizado al área en cuestión por nuestro equipo el 6-06-2009 (Figura 20), corroboran dicha hipótesis.

Luego la expansión de la corriente, salvo en las áreas directamente alteradas por el encauzamiento de 1981, se comporta como en el pasado; se forma un flujo principal centrado en una pequeña superficie de mayor calado (derramadero o caño, según las circunstancias del lugar) y una expansión lateral del flujo restante a ambos lados de la hendidura central, que circula con menor velocidad y tiende a ocupar la mayor superficie posible; de este modo opera la corriente en el área de inundación-laminación establecida en la Actuación núm. 3. Este efecto permite asumir que el principal objetivo de dicha Actuación es posible; es decir, laminar e incluso descargar de sedimentos los flujos de avenida en las superficies destinadas al efecto.



Figura 19. *Fotografías superiores.* Estado de la avenida del arroyo del Partido en el vertedero lateral del DIQUE 1 y en el área de inundación-laminación establecida en la *Actuación núm. 3* a las 13:40 horas locales del día 2-02-2009. Izquierda: vertedero lateral del DIQUE 1. Se observa que ha dejado de pasar agua por encima de él a esa hora. Derecha: Superficie inundada con anterioridad, tras el paso de la avenida por el vertedero lateral, en el área destinada a tal fin con la *Actuación núm. 3*. *Fotografías inferiores.* Estado de la avenida del arroyo del Partido en el vertedero lateral del DIQUE 1 y en el área de inundación-laminación establecida en la *Actuación núm. 3* a las 13:20 horas locales del día 5-02-2009. Izquierda: paso de la avenida por los 60 m operativos del vertedero lateral del DIQUE 1 hacia el área de inundación-laminación. Derecha: inundación en el área reservada al efecto y su adecuación a la topografía definida por los antiguos derramaderos existentes en el lugar. (Fotografías C. Urdiales).

Desagüe del flujo de las avenidas del arroyo del Partido en la marisma del PND, tras su laminación y deposición de los sedimentos transportados en la superficie destinada al efecto en la Actuación núm. 3 del Proyecto Doñana 2005

Por último, falta por explicar cómo era y cómo debe ser en el futuro la descarga final de las avenidas del arroyo del Partido en la marisma del PND, para que ésta no vea alterados sus contornos por procesos de sedimentación. Ello exigió nuevamente investigar sobre lo que ocurría en el pasado anterior al encauzamiento del arroyo del Partido en 1981. Las fuentes a las que se recurrió fueron: *a)* la morfología que presentaba el caño Ajolí, que actuaba como un verdadero canal de desagüe del arroyo del Partido en el entorno de la aldea de El Rocío; *b)* el testimonio de las personas más autorizadas del lugar que podían aportar sus recuerdos del pasado. Ambas no deben contradecirse con las ecuaciones de continuidad y del movimiento del agua que rigen en los cauces abiertos.

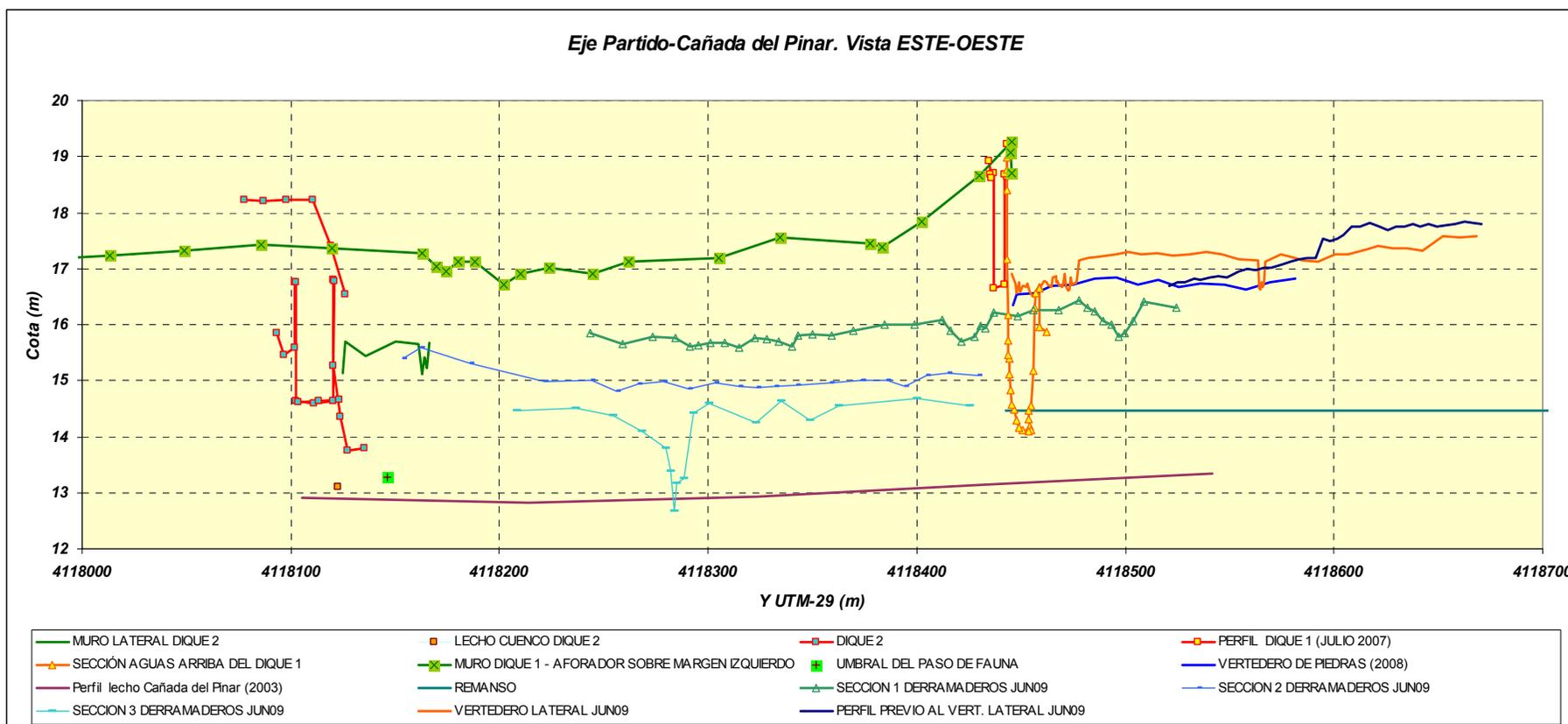


Figura 20 Elementos del Sistema de Control de Avenidas de la Actuación núm. 3 del Proyecto DOÑANA 2005, vistos de este a oeste.

a) Muro lateral que dirige al flujo hacia el vertedero del DIQUE 2 en el verano de 2008 (verde oscuro); **b)** Sección transversal al cauce del arroyo del Partido aguas arriba del DIQUE 1 (naranja con triángulos); **c)** Perfil del lecho de la Cañada del Pinar (morado); **d)** Tercera sección definida por el flujo que atraviesa el área de inundación-laminación levantada el 6-06-2009 (azul claro y trazo fino); **e)** Cota del lecho del cuenco del DIQUE 2 (cuadrado amarillo) **f)** Muro del margen izquierdo del arroyo del Partido entre el DIQUE 1 y el dique del aforador núm. 151 (verde con cuadrados); **g)** Curva de remanso en el arroyo del Partido aguas arriba del DIQUE 1 (gris); **h)** Perfil del vertedero lateral del DIQUE 1 en el levantamiento del 6-06-2009 (naranja); **i)** Perfil del DIQUE 2 (en rojo con cuadrados grises); **j)** Umbral del paso de fauna próximo al DIQUE 2 (cruz, sobre fondo verde claro); **k)** Primera sección definida por el flujo que atraviesa el área de inundación-laminación levantada el 6-06-2009 (verde con triángulos); **l)** Perfil del terreno anterior al vertedero lateral del DIQUE 1 el 6-06-2006 (azul oscuro); **m)** Perfil del DIQUE 1 (rojo con cuadrados amarillos); **n)** Vertedero lateral del DIQUE 1 en septiembre de 2008 (azul); **o)** Segunda sección definida por el flujo que atraviesa el área de inundación-laminación levantada el 6-06-2009 (azul de trazo fino).

A través de la primera fuente se sabe que, con anterioridad al encauzamiento del arroyo del Partido (1981) la corriente de sus avenidas, tras expansionarse sobre su primitivo cono de sedimentación, donde experimentaba los procesos de laminación y descarga de sedimentos, drenaba hacia varios canales de desagüe de dicho cono, para a través de ellos descargar a la marisma del PND en un régimen permanente. Uno de estos canales, también llamados caños, era el caño Ajolí, que desembocaba en la marisma de El Rocío. Tras el encauzamiento (1981) el caño Ajolí quedó aterrado; pero a medida que el nuevo cono de sedimentación formado sobre la marisma se ha ido estabilizando, porque la corriente de las avenidas del arroyo que llega hasta el paraje de El Rocío se ha ido reduciendo tras la construcción del DIQUE 1 (2006), el arroyo ha ido adquiriendo una geomorfología tipo caño su tramo final previo a su afluencia en la zona inundada de la marisma de El Rocío, similar a la que tenía en el pasado; aunque en este último caso el caño se formaba a más de un Km. aguas arriba de donde se ha formado el actual.

La morfología de los caños se analizó sobre los restos que quedaban sin alterar del caño Ajolí (1996). Esquemáticamente respondía a una sección con una concavidad pronunciada, excavada sobre un relieve convexo, con una anchura en la base variable, oscilando del orden de 1,50 m aproximadamente, que se ensancha conforme asciende hacia la superficie, hasta alcanzar una sección máxima de unos 10 m en la zona más exterior, todo ello para una profundidad máxima del cauce de unos 2 m y una pendiente del orden de $0,00165 \text{ m}\cdot\text{m}^{-1}$. Por él circula el agua en los momentos de caudales mínimos. En las avenidas extraordinarias este perfil se extiende a ambos márgenes del curso de aguas mínimas, inundando las superficies adyacentes a ambos lados del cauce. De este modo en situaciones de avenidas se obliga a la corriente a divagar por la superficie, circulando el flujo con una anchura variable y unos calados igualmente variables, altos para la zona central del cauce (que se reduce a un máximo de unos 10 m) y bajos para el resto de la divagación (que puede extenderse a cientos de metros a cada lado del cauce); con ello las tensiones de arrastre del flujo resultan altas en el centro del cauce y bajas para el resto de la circulación de la avenida, garantizando de este modo la estabilidad del terreno en la zona anterior a la marisma, pues el cauce central representa una porción muy pequeña de la lámina de inundación.

El cauce que actualmente presenta el arroyo del Partido antes de desembocar en la zona inundada de la marisma, adopta un perfil similar al de su antiguo caño. El pasado 17-10-2008 se midió una sección del arroyo en el tramo en cuestión (Figura 21, esquema de la izquierda). Las operaciones realizadas en dicha sección se detallan en la Tabla 4; en cuya última columna (de fondo azul más oscuro) se estima la capacidad de evacuación para la situación de llenado total del caño (como se muestra en la Figura 21, esquema de la derecha) en $4,06 \text{ m}^3\cdot\text{s}^{-1}$; dato que se ha tenido en cuenta en la rectificación del perfil del vertedero frontal del DIQUE 1 en la Actuación núm. 3 del Proyecto Doñana 2005. Se trata en principio de un valor que puede responder a la capacidad natural de evacuación del caño; es decir, a la que se adecua a un caudal generador del lecho ligado a su pendiente de compensación; esta última se ha establecido a través de mediciones en el terreno. En cualquier caso, el caudal de $4 \text{ m}^3\cdot\text{s}^{-1}$ corresponde a situaciones de avenidas ordinarias en el tramo final del arroyo del Partido, que se asocia a caudales de avenidas aguas arriba del DIQUE 1 del orden de $20 \text{ m}^3\cdot\text{s}^{-1}$ (Tabla 3)

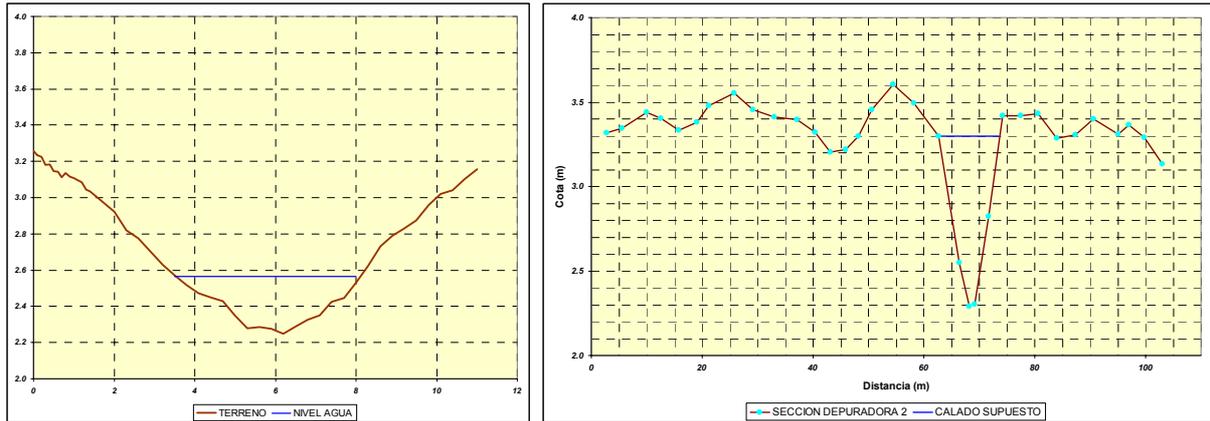


Figura 21 Izquierda: Sección de aforo en el arroyo del Partido, transformado en caño, en el tramo anterior a su afluencia en la zona inundada de la marisma de El Rocío, el 17-10-2008. Derecha: Calado en la misma sección para el supuesto que transporte un caudal de $4,06 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$; prácticamente llena.

Tabla 4. Operaciones realizadas en la sección de aforo de la Figura 21 para establecer sus parámetros hidráulicos fundamentales. En la columna del centro se muestran dichos parámetros para la situación del día 17-10-2008, hacia las 13:00 horas. En la columna de la derecha se estiman los mismos parámetros en el supuesto que el caño se encuentre prácticamente lleno.

Pendiente:		Aforo:		Sección llena:	
Distancia	196 m	DISTANCIA:	5.3 m	Área mojada:	0.8400 m ²
Hmax (079)	3.0990 m	TIEMPOS:	15.78 s	Calado med.:	0.2000 m
Hmin (087)	2.6474 m		11.00 s		
Pendiente-1	0.0023		13.70 s		
			12.23 s	V. Media:	0.3295 m/s
			15.00 s	(0.85*Vsup)	
Distancia	331 m		11.50 s		
Hmax (087)	2.6474 m		16.00 s	n:	0.037
Hmin (104)	2.2300 m		15.00 s	j:	0.0013
Pendiente-2	0.0013		13.20 s	V. Manning	0.3282 m/s
			14.00 s		
			13.00 s		
Distancia	386 m			CAUDAL:	0.2768 m³/s
Hmax (104)	2.2300 m				
Hmin (115)	2.0958 m			CAUDAL:	4.0644 m³/s
Pendiente-3	0.0003	V. Superficial	0.3876 m/s		

Los trabajos de campo, efectuados en el cono de sedimentación del arroyo del Partido entre julio y octubre de 2008, mostraron que para un caudal del orden de $0,3 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ en tramo final del caño del Partido (Figuras 21 y 22) su cono de sedimentación no presentaba crecimiento aparente. Para caudales superiores hasta los $4,06 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ (Tabla 4) la emisión de sedimentos a la marisma se puede mantener en valores moderados, pues la avenida sigue concentrada en el caño, por lo que en la práctica el transporte casi se reduce a los sedimentos en suspensión. Podría estimarse que el caudal que debe circular en el tramo final del arroyo del Partido, el anterior a su afluencia en la zona inundada de la marisma, debe mantenerse entre dichos valores $0,3 < Q (\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}) < 4,06$ y que los mismos se pueden identificar con los caudales generadores del lecho medio y máximo respectivamente. De igual manera se aclara que aunque la pendiente de compensación del tramo final del arroyo del Partido se ha establecido en $0,0016 \text{ m} \cdot \text{m}^{-1}$; las pendientes locales del arroyo van disminuyendo conforme se aproxima su afluencia en el área inundada de la marisma.



Figura 22. Desembocadura del arroyo del Partido, convertido en caño, en la marisma de El Rocío en julio de 2008

Si el caudal de avenida supera dichos valores, el mejor modo de operar con ellos es permitiendo a la corriente que se expanda a ambos lados del caño central, para lo que se necesita dejar el espacio suficiente; desplazando las motas de protección a los límites del mismo; de este modo se reduce la tensión de tracción del flujo y se posibilita una última laminación y deposición de los sedimentos antes que la corriente afluya a la marisma, pues de manera natural las avenidas tienen a expandirse y a ocupar la mayor superficie siempre que es posible.

Resumiendo sobre la cuestión del desagüe final de los caudales de avenida del arroyo del Partido en la marisma del PND, cabe diferenciar entre: A) la situación planteada por tramo final del arroyo-caño del Partido en la marisma de El Rocío; B) la funcionalidad para tal fin del arroyo de la Cañada del Pinar.

A) En lo que respecta al tramo final del arroyo-caño del Partido: a) atendiendo a lo expuesto en este último epígrafe, b) considerando los valores establecidos en la Tabla 3 y c) asumiendo que dicho caño debe comportarse lo más parecido posible a lo que hacía en el pasado anterior a 1981, para no causar problemas en el entorno oriental de la aldea de El Rocío; se analizan las situaciones posibles que tras la ejecución la Actuación núm. 3 del Proyecto Doñana 2005 se plantean; así como el modo que dicha Actuación contribuye a solucionarlas:

1) Mientras los caudales de avenida del arroyo del Partido aguas arriba del paramento superior del DIQUE 1 sea $< 20 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$; la situación está controlada; pues la distancia entre la sección donde se ubica el dique y la desembocadura del arroyo del Partido en la zona inundada de la marisma supera los 5 Km.; en los que los $6 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ que descarga el vertedero frontal del DIQUE 1 al cauce del arroyo pueden laminarse, sobre todo teniendo en cuenta que en el tramo inmediatamente anterior la zona inundada existe una amplia llanura (que antes del encauzamiento del arroyo del Partido fue marisma).

2) Si el caudal de avenida del arroyo del Partido aguas arriba del paramento superior del DIQUE 1 está comprendido entre $20 < Q (\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}) < 100$; la descarga directa al cauce del arroyo por el vertedero frontal del DIQUE 1 alcanza teóricamente $15 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ y en la práctica puede superar este valor, pero la situación también resulta controlable; de hecho las avenidas de los días 1 y 5 de febrero de 2009 se estima que descargaron por encima de los $20 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ y no crearon en la superficie del entorno oriental de la aldea de El Rocío problemas serios de inundación-sedimentación. Sin embargo se debe planificar dicha superficie, para que la

corriente circule por ella como se asume que lo hace por un caño en el paraje en cuestión, concentrando los $4 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ en la propia sección del caño y expansionándose los restantes $11 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ a ambos lados del mismo; para lo que es preciso evitar los posibles obstáculos al movimiento de la corriente que pudieran impedirlo.

3) Si el caudal de avenida del arroyo del Partido aguas arriba del paramento superior del DIQUE 1 es $> 100 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$; hay que contemplar las circunstancias siguientes: a) los caudales que se estima que lleguen hasta el entorno de la aldea de El Rocío se reducen por debajo del 15 % de los que llegaban antes de la construcción y rectificación del DIQUE 1 (2009); lo que representa una mejora muy significativa; b) que dichos caudales, aunque sean elevados (en la Tabla 3 se señala hasta $40 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$), son de un orden de magnitud que permiten una planificación; c) la frecuencia de estas avenidas es mucho menor. A todo ello, hay que añadir que la Actuación núm. 3 también contribuye a asegurar el caudal de régimen normal del arroyo del Partido en el entorno en cuestión, lo que supone una recuperación hidro-ecológica importante del mismo.

B) En lo que afecta a la funcionalidad del arroyo de la Cañada del Pinar como segundo cauce de desagüe, para el agua almacenada en el área destinada en la Actuación núm. 3 para inundación-laminación-sedimentación tras las avenidas del arroyo del Partido; hay dos razones que apuntan que en el pasado estuvo operativo:

1) La disposición de la red de drenaje natural en el paraje en cuestión, junto con los testimonios de la gente del lugar que conocieron su funcionamiento anterior al encauzamiento del arroyo del Partido (1981). Según éstos, el caudal que tras las avenidas se concentraba en el arroyo de la Cañada del Pinar, se dirigía a otro curso de mayor sección de evacuación, llamado Caño Mayor, y a través de éste último y conjuntamente con su caudal descargaba a la marisma del PND en un paraje diferente al de El Rocío. Situación que se ha vuelto a reproducir en las avenidas de los días 1 y 5 de febrero de 2009, aunque hayan transcurrido 25 años sin que tuviera lugar.

2) La verificación de la ecuación de continuidad: si por el caño Ajolí discurría un caudal que no rebasaba en avenidas ordinarias los $4 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$, lo razonable es suponer que en las máximas avenidas no se triplicara ese caudal, porque de lo contrario no se hubiera conservado la geomorfología del caño Ajolí; de hecho ésta se alteró por completo con las avenidas ocurridas en el arroyo tras su encauzamiento que llegaban hasta El Rocío, que multiplicaron por veinte e incluso más dicho valor. Por tanto, el caudal de avenida que no se dirigiera a la marisma de El Rocío, tenía que descargar a la marisma por otro paraje.

Pero la cuestión no radica en la distribución de los caudales de avenida entre los diferentes canales o caños de desagüe, como en la posibilidad que dichos caudales alcancen valores que provoquen erosión de fondo en sus cauces de evacuación, como ocurrió en el tramo encauzado del arroyo del Partido entre 1982-2006. Esta cuestión retrasó la redacción y ejecución de la Actuación núm. 3 y posteriormente ha sido la causa de la rectificación del perfil del vertedero frontal del DIQUE 1, para asegurarse que el actual cono de sedimentación situado sobre la marisma se estabilice y se eviten problemas de inundación-sedimentación en el entorno oriental de la aldea de El Rocío; pero se abre el interrogante de lo que pudiera ocurrir en el cauce del Caño Mayor en el futuro.

Lógicamente la única forma de conocer lo que puede suceder en el futuro en Caño Mayor es a

través de un Seguimiento; pero hay motivos para suponer que: a) si no se le altera su geomorfología (no se actúa sobre su sección de desagüe, ni se ponen obstáculos para la circulación de la corriente) y b) se comporta como anteriormente se ha descrito que funcionan los caños en el paraje que se comenta; puede conducir los caudales procedentes de la nueva superficie de inundación-laminación-sedimentación hacia la marisma, sin provocar problemas geo-torrenciales de importancia en su recorrido.

CONCLUSIONES

En esta comunicación se expone el Seguimiento del proyecto de corrección del tramo final de un curso torrencial, en concreto del arroyo del Partido que vierte directamente a la marisma de El Rocío en el Parque Nacional de Doñana (España). La corrección de todo curso torrencial implica la adaptación de las obras ejecutadas y de las disposiciones adoptadas con el proyecto restaurador, a la dinámica geo-torrencial que los futuros eventos o precipitaciones torrenciales impriman al curso que ha sido objeto de las primeras medidas de corrección; lo que obliga a conocer la incidencia de dichos eventos sobre lo ejecutado-dispuesto con el proyecto, para planificar las rectificaciones pertinentes, a fin de alcanzar más adelante los objetivos previstos con las actuaciones proyectadas, en este caso con la Actuación núm. 3 del Proyecto Doñana 2005.

Dado que el escenario objeto del proyecto, en la fecha anterior a su redacción (2003), se encontraba alterado por los efectos causados por el geo-dinamismo torrencial, motivado por las avenidas torrenciales acaecidas en el arroyo del Partido a partir del encauzamiento de su tramo final (1981); lo primero que se proyectó fue un Sistema de Control para las futuras Avenidas de dicho arroyo; para a continuación en base al mismo ejecutar el proyecto, realizando las obras diseñadas y adoptando las disposiciones espaciales necesarias para la operatividad y eficacia de dichas obras (2006). Posteriormente, tras comprobar el comportamiento de lo realizado ante los nuevos eventos torrenciales acaecidos en el escenario de la restauración del tramo final del arroyo del Partido, se proyectó y ejecutó (2008) las rectificaciones pertinentes y se ha comprobado el comportamiento del nuevo escenario rectificado ante dos avenidas importantes del presente año (2009); para ir planificando nuevas rectificaciones en el futuro, hasta conseguir que tanto hidráulicamente como desde el punto de vista hidrológico el arroyo del Partido recupere la funcionalidad que presentaba con anterioridad a su encauzamiento (1981), garantizando de este modo que su circulación por el entorno oriental de la aldea de El Rocío no cause problemas de inundación-sedimentación en el mismo, sino que estos procesos se trasladen a una superficie destinada en el proyecto para tal fin, aguas arriba del paraje de El Rocío y próxima a donde existía en el pasado el primitivo cono de sedimentación del arroyo del Partido.

Más que conclusiones específicas, que se centrarían en la investigación de cuestiones concretas relacionadas con futuras rectificaciones a realizar sobre el proyecto inicial de reconstrucción del arroyo del Partido, para aplicarlas a continuación a modo de aproximaciones sucesivas; lo que se quiere transmitir en este apartado es la metodología de la restauración de un curso torrencial que ha sufrido procesos de alteración y degradación de sus condiciones naturales primarias por fenómenos geo-torrenciales, originados por causas naturales o provocadas e incluso por ambas a la vez, como en el caso analizado en la presente comunicación. Dicha metodología implica en primer lugar conocer el estado físico y el funcionamiento del curso a corregir y de su cuenca vertiente; a continuación controlar los fenómenos geo-torrenciales del curso en cuestión mediante un proyecto de restauración

fundamentalmente hidráulico y, posteriormente, conseguir su plena recuperación hidrológica y ecológica, donde la restauración hidrológico-forestal de la cuenca y la recuperación de las riberas aseguren la efectividad de las obras hidráulicas en el transcurso de la consolidación del proyecto hidráulico.

***Agradecimiento.** El proyecto de Seguimiento descrito en esta comunicación, es una síntesis del trabajo realizado tras la ejecución del proyecto de restauración hidráulica-hidrológica del tramo final del arroyo del Partido. Este último proyecto forma parte del “Proyecto Doñana 2005” de Regeneración Hídrica del Parque Nacional de Doñana, concretamente se trata de su Actuación núm. 3. Se reconoce a la Comisión Científica del Proyecto Doñana 2005 y en especial a su primer Coordinador D. Félix Manuel Pérez Miyares la confianza depositada en nuestro equipo para llevar a cabo el Seguimiento de la citada Actuación núm. 3. También se agradece al Director del Proyecto de Obra D. Benigno Bayán Jardín y al Responsable Técnico del Área de Conservación del Parque Nacional de Doñana D. Carlos Urdiales Alonso, su continua colaboración en el desarrollo del presente Seguimiento.*

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Mao L. (2004) *Analisi comparativa del trasporto solido di corsi torrentizi in diversi ambiti geografici.* Tesis Doctoral, pp. 307, Dipartimento Territorio e Sistema Agro-Forestali, Università degli Studi di Padova (Italia).

Ministerio de Medio Ambiente (2002) Resumen de la Actuación núm. 3 Restauración del arroyo del Partido, Fase I, 15 pp., 4 planos, Proyecto DOÑANA 2005 (Regeneración hídrica de las cuencas y cauces vertientes a las marismas del Parque Nacional de Doñana), Diciembre.

Mintegui Aguirre J. A., Robredo Sánchez J. C., Sendra Arce P. J. (2003) *Avenidas torrenciales en el arroyo del Partido y su incidencia en la marisma del Parque Nacional de Doñana,* pp. 373, Naturaleza y Parques Nacionales, Serie Técnica, Organismo Autónomo Parques Nacionales, Madrid. ISBN: 84-8014-515-3.F

Mintegui J. A., Robredo J. C., Sendra P. J. (2004) Development of sedimentation into the northern wetland of the Doñana National Park (Spain), *IAHR-UPM Congress, Proceedings of Fifth International Symposium on Eco-hydraulics, September 12-17, 2004, Aquatic Habitat: Analysis & Restoration,* Madrid (Spain), Vol. 1, pp. 274-280, Madrid

Mintegui Aguirre J. A. (2005) El arroyo del Partido: Un ejemplo de los desafíos que plantea la restauración hidrológica, *Doñana: Agua y Biosfera* (editores: García Novo F. & Marín Cabrera C.), pp. 137-140, Ministerio de Medio Ambiente, Confederación Hidrográfica del Guadalquivir, Doñana 2005, UNESCO y MAB.

Mintegui Aguirre J. A., Lenzi M. A., Robredo Sánchez J. C., Mao L. (2006) *Mobilización versus estabilización de los sedimentos en cursos sometidos a la dinámica torrencial,* pp. 143, Naturaleza y Parques Nacionales, Serie Técnica, Organismo Autónomo Parques Nacionales, Madrid, ISBN: 10 84-8014-665-6 y ISBN: 13 978-84-8014-665-4.

Mintegui Aguirre J. A., Robredo Sánchez J. C., et al. (2006) Análisis del impacto sobre la hidrología superficial y en las posibles alteraciones morfológicas sobre la marisma, Trabajos de campo y estudio del estado físico de la marisma en la fase anterior a las actuaciones del

Proyecto DOÑANA 2005, Memoria 129 pp., 7 anexos, Seguimiento del Proyecto Doñana 2005, Escuela Técnica Superior de Ingenieros de Montes, Departamento de Ingeniería Forestal, Universidad Politécnica de Madrid.

Mintegui Aguirre J. A., Robredo Sánchez J. C., et al. (2008) Situación en octubre de 2008 de las obras de recuperación hidráulica e hidrológica efectuadas con la Actuación núm. 3 del Proyecto Doñana 2005, en el tramo del arroyo del Partido anterior a su afluencia en la marisma de El Rocío. Memoria 2007-08, 71 pp., Seguimiento del Proyecto Doñana 2005, Escuela Técnica Superior de Ingenieros de Montes, Departamento de Ingeniería Forestal, Universidad Politécnica de Madrid

Mintegui Aguirre J. A., Robredo Sánchez J. C., et al. (2009) Análisis del impacto sobre la hidrología superficial y en las posibles alteraciones morfológicas sobre la marisma, Trabajos de campo y estudio del estado físico de la marisma en la fase posterior a las actuaciones del Proyecto DOÑANA 2005, Memoria: Análisis de la formación del cono de sedimentación en un curso torrencial: Aplicación a la situación del arroyo del Partido en la marisma de El Rocío (Parque Nacional de Doñana, 139 pp., Seguimiento del Proyecto Doñana 2005, Escuela Técnica Superior de Ingenieros de Montes, Departamento de Ingeniería Forestal, Universidad Politécnica de Madrid.

Robredo Sánchez J. C., Mintegui Aguirre J. A. et al. (2008) Memoria anual del Proyecto de ampliación seguimiento y actualización del modelo sedimentario de la marisma del Parque Nacional de Doñana, 110 pp., Anexo 49 pp., Escuela Técnica Superior de Ingenieros de Montes, Departamento de Ingeniería Forestal, Universidad Politécnica de Madrid.

Saura J.; Bayán B.; Casas J.; Ruiz de Larramendi A.; Urdiales C. (2001) *Documento Marco para El Desarrollo Del Proyecto Doñana 2005, Regeneración hídrica de las cuencas y cauces vertientes a las marismas del Parque Nacional de Doñana*, pp. 201, Ministerio de Medio Ambiente.

Sendra Arce P. J. (2002) *Investigación cuantitativa del transporte de sedimentos no cohesivos en avenidas torrenciales: Aplicación al caso del arroyo del Partido, Huelva*. Tesis Doctoral, pp. 400, Departamento de Ingeniería Forestal, Escuela T. S. Ingenieros de Montes, Universidad Politécnica de Madrid.

Sendra Arce P. J., Miintegui Aguirre J. A., Robredo Sánchez J. C. (2002), *El arroyo del Partido: un torrente dormido*, Medio Ambiente M. A., núm. 41, pp. 52-57, Consejería de Medio Ambiente, Junta de Andalucía.

Urdiales Alonso C. (1996) Informe Cambios recientes en el tramo final del arroyo del Partido, Parque Nacional de Doñana, Organismo Autónomo Parques Nacionales, Ministerio de Medio Ambiente.