



UNIVERSIDAD DE JAÉN
Escuela Politécnica Superior

SIMULACIÓN NUMÉRICA BIDIMENSIONAL DEL RÍO GUADALQUIVIR A SU PASO POR LA PRESA DE MARMOLEJO

Alumno: Justo Antonio Mercado Pérez

Tutor: Prof. D. Patricio Bohórquez Rodríguez de Medina

Dpto: Ingeniería Mecánica y Minera

Junio, 2015



Universidad de Jaén
Escuela Politécnica Superior de Jaén
Departamento de Ingeniería Mecánica y Minera

Don Patricio Bohórquez Rodríguez de Medina , tutor del Proyecto Fin de Grado titulado: SIMULACIÓN NUMÉRICA BIDIMENSIONAL DEL RÍO GUADALQUIVIR A SU PASO POR LA PRESA DE MARMOLEJO, que presenta Justo Antonio Mercado Pérez, autoriza su presentación para defensa y evaluación en la Escuela Politécnica Superior de Jaén.

Jaén, junio de 2015

El alumno:

Justo Antonio Mercado Pérez

Los tutores:

Patricio Bohórquez de Medina

ÍNDICE

1. INTRODUCCIÓN Y MOTIVACIÓN	05
2. DATOS DE ENTRADA	09
2.1 Modelado Digital de Terreno	09
2.2 Calado de sitio de estudio	10
3. LOCALIZACIÓN DEL SITIO DE ESTUDIO	12
3.1 Localización y características físicas del cauce	12
3.1.1 Geomorfología fluvial del cauce a estudiar	15
3.1.1.1 Subtramo 1	16
3.1.1.2 Subtramo 2	17
3.1.1.3 Subtramo 3	20
3.1.2 Clima de la zona de estudio	21
3.2 Modelo Digital de Elevaciones	22
4. PRE-, POS-, PROCESADO	28
4.1 Modelado bidimensional del flujo	29
4.1.1 Ecuaciones de Saint-Venant	29
4.2 Preprocesado	33
4.3 Procesado	51
5. RESULTADOS	57
5.1 Compuertas abiertas	57
5.2 Compuertas cerradas	67
5.3 Estudio del movimiento de sedimento	74

5.3.1 Compuertas abiertas	77
5.3.2 Compuertas cerradas	79
6. CONCLUSIONES	81
7. BIBLIOGRAFÍA DEL TRABAJO FIN GRADO	84
7.1 Publicaciones	84
7.2 Referencias	85

1. Introducción y motivación

Ese proyecto está orientado a la simulación numérica del flujo del río Guadalquivir a su paso por la presa de Marmolejo, localidad perteneciente al término provincial de Jaén. Dicho estudio se desarrollará a lo largo de venideros y distintos capítulos en los que se irá mostrando el contexto sobre los acontecimientos que llevan a la realización este estudio, desde los datos de entrada necesarios para desarrollar nuestro estudio hasta los resultados que nos mostrará nuestra simulación que servirán para evaluar los efectos inducidos por la presa de Marmolejo sobre el nivel del agua del río Guadalquivir.

El sitio de estudio en cuestión se localiza a las afueras del municipio de Marmolejo. El sitio está ubicado bajo las coordenadas $38^{\circ} 03' 29.3''$ N – $4^{\circ} 11' 11.2''$ W, esta presa fue construida sobre el cauce del Guadalquivir en 1962, se encuentra situada entre la Presa del Encinarejo localizada en el municipio de Andújar, localidad perteneciente al término provincial de Jaén, construida en 1932 y las Presas de Martín Gonzalo y Yeguas situadas ambas en el municipio de Montoro, localidad perteneciente al término provincial de Córdoba, construidas ambas en el año 1989.



Figura 1.1. Presa del Encinarejo, de Martín Gonzalo y Yeguas. De izquierda a derecha. [1]

La finalización de la infraestructura de la Presa fue durante el año 1962, como ya hemos mencionado anteriormente. Este embalse pertenece a la confederación hidrográfica del Guadalquivir y tiene una capacidad aproximada de 13 hectómetros cúbicos. El tipo de presa utilizada es de gravedad, de mampostería y planta recta con aliviadero de labio fijo con 7 vanos. La finalidad

y objetivos por los que se construyó el embalse fueron electricidad y riego, aunque actualmente se utiliza para electricidad solamente.

Como hemos mencionado, el embalse tenía una capacidad de 13 hectómetros cúbicos, aunque en menos de 30 años el embalse se ha colmatado en un 70% lo que significa que de la capacidad que teníamos inicialmente en solo 30 años pasó a ser de 3.9 hectómetros cúbicos de agua. Este problema de colmatación se debe a la existente zona geográfica en la que se encuentra Marmolejo, y en general la provincia de Jaén, ya que la sedimentación se produce en menor tiempo que en el resto de España, debido al uso y manejo del suelo en el cual predomina una composición arcillosa y arenosa que provoca la sedimentación como podemos observar en la siguiente tabla.

Tabla 1. Grado y tasa de colmatación de algunos embalses españoles. [2]

Embalse	Capacidad inicial (Hm ³)	Volumen sedimento (Hm ³)	Colmatación (%)	Tasa colmatación (%/año)
Entrepeñas	890	50	6	0,5
Mequinenza	1.500	200	13	0,4
Barasona	90	18	20	0,4
Guadalmellato	162	44	27	0,7
Pedro Marín	19	18	95	5,9
Doña Aldonza	23	22	96	6,4

Como se observa los embalses Pedro Marín y Doña Aldonza situados en la provincia de Jaén son los que presentan mayor colmatación. Tras este inciso sobre el problema de la sedimentación, creo que necesario para entender el alcance que puede tener este proyecto, cabe destacar que en un futuro podrá ser utilizado para realizar un estudio sobre sedimentación en la zona. A continuación desglosaremos los capítulos en los que está dividido este proyecto.

El estudio ha comenzado con esta introducción donde describimos lo que queremos hacer y explicamos brevemente algo de historia de nuestra presa y su situación; el estudio seguirá con la realización de una breve descripción de los

datos de entrada de los cuales se han tenido disponibilidad y una incisión de cómo se han obtenido ya que muchos de ellos no son de uso público por ser considerados información sensible.

Tras la descripción de los datos de entrada pasaremos al capítulo 3, el cual comenzará con la descripción de las características del sitio de estudio, se realizara un estudio de la localización respecto a sus aspectos físicos que puedan servir para entender el porqué de la zona que se simulará. El cauce del río Guadalquivir ha sido objeto de investigaciones anteriormente, debido a diversas situaciones dadas en un pasado, por lo que se dispondrá de una gran cantidad de información relacionada con los aspectos físicos del sitio de estudio, la cual se obtiene de proyectos [3] anteriores relacionados con este tema y cuyo tutor ha sido Patricio Bohórquez.

Una vez descritas la localización y los aspectos físicos del sitio se ofrecerá información sobre el clima actual en la zona de estudio, para justificar los caudales que tomaremos en nuestra simulación, y seguidamente la geomorfología fluvial del cauce Guadalquivir donde describiremos el tramo a simular y realizamos una definición de las posibles variables que podemos encontrar en nuestro proyecto, y los posibles efectos sobre nuestra simulación.

Por último, y no por eso menos importante, la obtención de un Modelo Digital de Elevaciones del Terreno de gran calidad ya que la simulación posteriormente realizada se verá muy influenciada por la topografía del terreno. Se ha recurrido a la tecnología disponible en la actualidad, haciéndose uso de una aplicación donde es posible obtener un mapa topográfico del terreno, véase como ejemplo la aplicación “Global Mapper”.

El capítulo 4 corresponde a la realización de la descripción detallada del proceso seguido para la realización de la simulación, donde describiremos las etapas de pre-, pro- y post- procesado. Para la realización de la simulación se hará uso del software Dassflow-Hydro; para el preprocesado donde se realiza la generación de la malla a usar en la simulación numérica 2D utilizaremos un software tipo Matlab u Octave.

El antedicho capítulo será el núcleo central de nuestro estudio, donde se empleará un modelo simplificado de aguas someras tipo Saint-Venant para calcular calado y velocidad del flujo resultante para caudales dados. Para llevar a cabo esto, son necesarios los datos obtenidos mediante el Modelo Digital de Elevaciones descrito en el capítulo 3. En definitiva, el capítulo 4 nos permite obtener los resultados de los cuales se desprenderán las conclusiones que se desarrollarán en capítulos posteriores.

Por último para la mejor comprensión de los resultados obtenidos en la simulación se desarrollaran dos capítulos; el capítulo 5 donde mostraremos los resultados obtenidos, teniendo en cuenta que se realizaran dos simulaciones una con la batimetría y otra sin ella. Y el capítulo 6 donde desarrollaremos las conclusiones desprendidas de los resultados obtenidos en el capítulo 5.

Por lo conjurado anteriormente creo que queda definida y justificada la importancia y el acuciamiento de este tipo de estudio, que nos mostrará el comportamiento del flujo del río Guadalquivir utilizando un modelo bidimensional simplificado de aguas someras tipo Saint-Venant, cuyos resultados servirán para evaluar los efectos inducidos por la presa sobre el nivel del agua en función de los caudales y su efecto sobre el riesgo de inundación, riesgo que ya ha sido estudiado por otros proyectandos.

2. Datos de entrada

Para la realización de este proyecto y su puesta a punto con el fin de realizar el mallado del sitio de estudio tomaremos como datos de entrada o de partida modelos digitales del terreno, necesarios para saber localizar la malla. A fin de poder tomar un tamaño adecuado para el paso de esta. A continuación, se hablará más detalladamente de los modelos digitales y como se han obtenido. También se hablará de la disponibilidad de las curvas del nivel del tramo del río aguas arriba de la presa, en estudio, en el año 2001.

2.1 Modelo Digital del Terreno

Las Ortofotos y Modelos Digitales del Terreno se obtienen de las Consejerías de Obras Públicas y Transportes, Medio Ambiente y Agricultura y Pesca de la Junta de Andalucía en el año 2001 como acuerdo de colaboración para establecer y desarrollar un “Programa Regional de obtención de Bases Cartográficas de Referencia de cobertura territorial de la región andaluza”.

Este Programa surge como una necesidad para desarrollar una actividad centrada en el adecuado control y gestión del territorio; se hace necesaria la generación de bases de referencia territoriales de calidad que permitan hacer análisis de precisión. De la misma forma estas bases de referencia serán comunes en todos los trabajos, de modo que la información pueda ser relacionada.

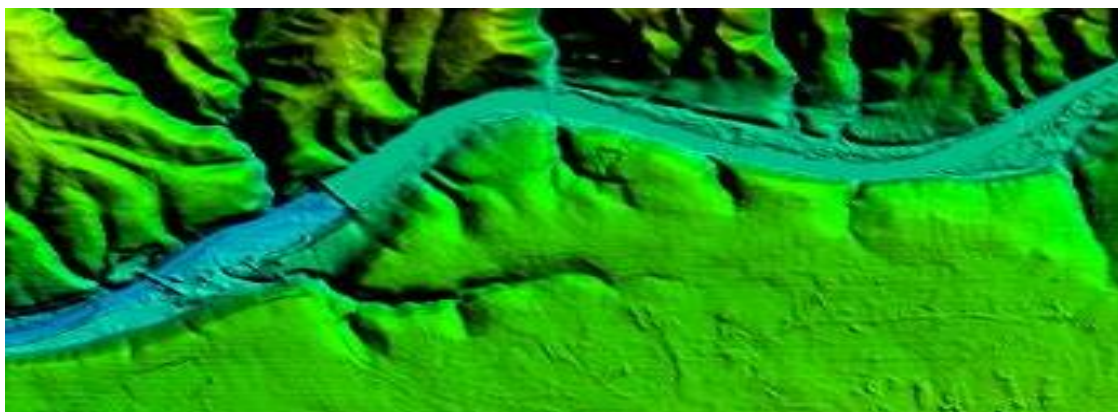


Figura 2.1. Modelo Digital del Terreno. [4]

Para la obtención de este Modelo Digital del Terreno, primeramente se intenta recurrir al “Proyecto PNOA” realizado por el Gobierno de España en el que se realiza un Vuelo LIDAR sobre toda España, aunque de esta información no es posible disponer puesto que en Andalucía se realizó en 2013 y hasta el año 2015 no se distribuye de manera pública el MDT LIDAR actualizado.

Teniendo en cuenta estas consideraciones, finalmente se recurre a un Vuelo LIDAR realizado por la Junta de Andalucía, en el año 2001, como se menciona en los párrafos anteriores a la Figura 2.1.

Para poder utilizar los modelos digitales del terreno se hará utilidad de un software estándar para nuestras competencias; véase el ejemplo de Global Mapper. Esta sección se desarrollará en el siguiente capítulo donde se hablará de la situación geográfica y se explicará la utilización de este software como utilidad en nuestro proyecto.

2.2 Calado del sitio de estudio

Comenzaremos realizando una pequeña introducción sobre la Confederación Hidrográfica del Guadalquivir, para describir su funcionamiento y como ha facilitado, a la hora de realizar este estudio, la disponibilidad de datos como los caudales aforados y la batimetría real del embalse.

Este Organismo fue creado a mediados del año 1927, con la función de responder sobre los criterios de descentralización institucional que existía en esos tiempos, por objeto sobre la base del río principal tenían que confederar todos los aprovechamientos existentes en él y sus afluentes, sin importar el destino que tuvieran sus aguas.

Este Organismo tiene 87 años, las primeras etapas comprendieron entre los años previos a la Guerra Civil, durante esta y los duros años de la postguerra. Durante esta etapa tras la constitución de la Republica cambiaría de nombre y las funciones, así mismo pasada la Guerra Civil cambiaría de nombre al que conocemos en nuestros días. Durante los años siguientes hasta la actualidad la Confederación Hidrográfica sufre cambios cualitativos importantes donde se incrementan sus competencias y responsabilidades.

En la actualidad las funciones del organismo de cuenca son entre muchas, la elaboración del plan hidrológico de la cuenca, su administración, control y explotación. Aunque en nuestro estudio lo que nos interesa es la atribución para la prestación de servicios técnicos relacionado con el cumplimiento de sus fines específicos.

Para poder realizar un estudio de una gran precisión, recurrimos a la Confederación Hidrográfica del Guadalquivir debido a sus competencias; esta Confederación mide el calado mediante tecnología Sonar con las cuales se obtienen las líneas de cota del río, es decir, la profundidad el río. Esta información no es de dominio público, se trata de información sensible, por lo que son proporcionadas por el tutor de este proyecto.



Figura 2.2. Batimetría del sitio de estudio.

Una vez que se tienen las cotas se incorporan al Modelo Digital de Terreno descrito en la sección anterior de este capítulo. En nuestro estudio se trabajará con el modelo en el que incorporamos la información de la Confederación Hidrográfica del Guadalquivir y sin ella. Esto permitirá hacer un estudio de sensibilidad frente a la calidad de los datos de entrada.

3. Situación geográfica

En el presente capítulo se describirán las características del sitio de estudio, “Embalse de Marmolejo”, nombre recibido por el municipio Marmolejo cercano a este embalse y perteneciente a la provincia de Jaén.

El presente capítulo estará dividido en dos partes. La primera parte describe la localización y características físicas de la zona de estudio, donde se realizará una descripción más cualitativa del sitio de estudio y del río, detallando la localización del tramo del río en el que se centra el proyecto, apoyado con fotografías reales tomadas in situ. A continuación, se refiere brevemente el clima que podemos encontrar a lo largo del año en el entorno de la presa y el cual es influyente en los caudales que pasan a través de esta y catástrofes ocurridas. Se hará hincapié en los aspectos más relevantes que afectan a la presa de estudio. Por último, la tercera parte presentará el Modelo digital de Elevaciones de elevada precisión.

3.1 Localización y características físicas del cauce

La simulación numérica se va a realizar sobre el río Guadalquivir, que fluye desde la Cañada de las Fuentes, lugar de nacimiento de este, situado en la sierra de Cazorla en el término municipal de Quesada. Su cuenca hidrográfica abarca territorios de Jaén; donde se encuentra nuestro sitio de estudio, Córdoba, Almería, Granada, Málaga, Sevilla, Huelva y Cádiz, así como otras regiones situadas fuera de la Comunidad Autónoma de Andalucía.

Jaén representa aproximadamente el 15.5% del territorio de la Comunidad Autónoma de Andalucía. En la Figura 3.1, se muestra la zona de estudio y el río Guadalquivir a su paso por Marmolejo.



Tal y como se muestra en la Figura 3.2, el río Guadalquivir ocupa una superficie comprendida entre las coordenadas $37^{\circ} 50' 35''$ N – $3^{\circ} 04' 01''$ O y $36^{\circ} 46' 44''$ N – $6^{\circ} 21' 14''$ O, extendiéndose 657 kilómetros hacia el suroeste, ya en la provincia de Cádiz. La superficie de la cuenca es de 57.071 kilómetros cuadrados.

Cerca del nacimiento del río Guadalquivir vemos que se produce la confluencia de este con el río Guadiana, la siguiente confluencia se trata del río Guadalén el cual atraviesa toda la comarca del condado y abastece varios embalses; como el embalse de Guadalén.

Al Oeste de las cuencas del Guadalén y el río Jándula, último río que se une a la cuenca del río Guadalquivir antes de alcanzar el embalse de estudio del proyecto; se encuentra la Presa de Marmolejo. La presa está situada cerca del Parque Natural Sierra de Cardeña y Montoro, colindando con la provincia cordobesa, con una superficie de 292 hectáreas.

La Figura 3.3 muestra puntos de interés presentes en la zona de estudio que más tarde describiremos, también se puede observar que a lo largo del curso de dicho río existen sedimentos como grava o rocas, y que se producen este tipo de formaciones a lo largo del flujo. Esto demuestra la enorme aplicabilidad de este proyecto, ya que este problema se da en numerosos ríos, con lo que el procedimiento que se seguirá en este proyecto se puede extrapolar al estudio de cualquier otro caso que pueda ser de interés.



Figura 3.3. Localización de puntos de interés y distintos tipos de problemas. [6]

3.1.1 Geomorfología fluvial del cauce a estudiar

El río se descompondrá en tres zonas, necesarias para comprender mejor el flujo hacia la presa. Esta descomposición nos permite en el capítulo 4 desarrollar el mallado del conjunto de estas zonas y como de preciso es el software utilizado para realizar la simulación para distintos caudales.

El cauce lo dividiremos en tres zonas: el subtramo 1 que comprende el meandro del río donde éste sufre un giro o cambio de dirección en el flujo, que puede condicionar el inicio del cauce en nuestro tramo a simular. Desde el final del subtramo 1 hasta que nos encontramos con el puente señalado en la Figura 3.3, se tratará del subtramo 2 o tramo de simulación, para el cual se desarrolla la malla y se realiza la simulación. Por último, describimos el subtramo 3 donde se encuentra el puente, este subtramo no influye en la simulación.

La división por tramos antedichos se muestra en la Figura 3.4 y Figura 3.5 donde se amplía el subtramo de simulación para una mejor visualización, posteriormente se pasa a describir los elementos más importantes de cada zona y características relevantes de manera gráfica para una mejor comprensión.



Figura 3.4. Vista aérea del río Guadalquivir a su paso por Marmolejo. [6]



Figura 3.5. Ampliación del subtramo de simulación.

3.1.1.1 Subtramo 1

El título de esta sección hace referencia a la zona mencionada anteriormente, subtramo 1. El subtramo primero hace referencia al meandro producido antes de la llegada a la presa de Marmolejo. En la Figura 3.6 podemos observar la curva descrita por el curso del río.



Figura 3.6. Formación meandro del río Guadalquivir a su llegada a la presa de Marmolejo.

Como se observa en la Figura 3.6 advertimos la formación del meandro. Un meandro es una curva descrita por el curso del río, cuya sinuosidad es

pronunciada. Se forman con mayor facilidad en los ríos de las llanuras aluviales con pendiente muy escasa, 1.2 por mil, como es el caso de nuestro sitio de estudio. Como se ha mencionado en el capítulo de motivación del proyecto, existe una problemática, y es que, por la erosión y el desprendimiento del material que forma el suelo limítrofe al río provoca que estos sedimentos suelen depositarse en las curvas de los ríos lo cual produce un cambio brusco en su morfología; véase el caso de nuestro estudio y la primera zona que estamos describiendo.

El sedimento, por un lado, incrementa la viscosidad de la mezcla sedimento-agua originando todo tipo de formas sedimentarias que modifican el cauce del río, y por otro, la posibilidad de transportar grava de dimensiones relativamente grandes. Estos pueden dañar la construcción hidráulica localizada en la zona de estudio, así como afectar al flujo que es lo que importa en este estudio. Hay que tener en cuenta que para caudales torrenciales tendremos un flujo turbulento no como se observa en la Figura 3.6, que tenemos un régimen laminar.

3.1.1.2 Subtramo 2

El subtramo 2 es el trecho donde se realiza la simulación numérica. Esta zona comienza al pasar el meandro y llega hasta la presa de Marmolejo, que podemos observar en la siguiente figura.



Figura 3.7. Visita del subtramo 2 situados en la presa de Marmolejo. [7]

La Figura 3.7 refleja la zona aguas arriba de la presa de Marmolejo, esta corresponde a una foto realizada durante una visita in situ del embalse y cuya capacidad estaba al completo en ese momento. Como se puede observar en la Figura 3.7, el río queda encauzado y fuertemente delimitado por sus taludes laterales. Hasta la llegada del río a la presa, el ancho del cauce es mayor que aguas debajo de esta, y el movimiento del flujo tras pasar el meandro se direcciona de manera preferente al movimiento. Además, la profundidad es mayor que aguas abajo. Pero aun así cuando el nivel de almacenamiento es escaso pudiendo observar la gran existencia de sedimentación en los márgenes del río, como se refleja en las siguientes ilustraciones.



Figura 3.8. Vista de la llegada del río a la presa de Marmolejo.



Figura 3.9. Vista aérea de la presa de Marmolejo.

En la Figura 3.9 podemos observar el nivel de sedimentación cuando la capacidad del embalse está baja. Esto es debido a que la velocidad de agua disminuye progresivamente desde el meandro hasta que se aproxima a la presa. En esta zona se favorece la deposición de sedimentos al no permitir que el cauce siga su cauce natural. La presa constituye en sí un obstáculo al flujo natural de agua y sedimentos; también es lógico pensar que al reducir la velocidad se induce una menor capacidad erosiva y una mayor tasa de deposición de sedimento y de agradación del cauce.

En la zona de estudio 2 aguas abajo de la presa de estudio cabe destacar dos partes importantes: el arroyo de las Graillas que descarga en el río Guadalquivir justamente al pasar la presa, antes de alcanzar el subtramo 3. Así como el terreno irregular y la presencia de una zona enramada en el cauce.

Aguas abajo de la presa de Marmolejo el flujo del río es bidimensional. En la siguiente Figura 3.10 se puede apreciar que el flujo no está encauzado, existiendo numerosas zonas secas y mojadas. Además se observa que la anchura es menor que aguas arriba y que el lecho sigue siendo un suministro continuo de grava que afectará a las presas contiguas a esta. Hay numerosos recrecimientos que desestabilizan el cauce. Si se observa en la Figura 3.10, observamos un ejemplo de recrecimiento de pizarra que está dividiendo el río en dos subcanales cuando la presa no abre sus compuertas.



Figura 3.10. Vista aérea aguas abajo del río Guadalquivir.

Cuando las compuertas están abiertas, solo existe un canal, hecho que se ilustrará en la simulación numérica. Respecto al arroyo de las Graillas no es de importancia, pero para estudios de sedimentación, se puede apreciar una gran cantidad de piedras y grava que pueden ser puestas en movimiento en el caso que circule agua sobre ellas, aportando una gran cantidad de sedimento, que puede acelerar la colmatación de los embalses.

3.1.1.3 Subtramo 3

De esta zona hay poco que resaltar, puesto que el puente no se tendrá en cuenta a la hora de realizar el estudio. Pero hay que tener en cuenta esta zona porque se toma como referencia para demostrar la precisión de nuestro software utilizado para el Modelo Digital del Terreno, y por eso se habla de este subtramo. A continuación, se mostrará la situación del puente y de su historia de inundaciones a lo largo de su vida.



Figura 3.11. Vistas del Puente; a la izquierda se observa una imagen del año 1906 y en la derecha la actual.

Como dato histórico, este puente de Marmolejo data de años anteriores al 1784 en cuya época se encontraba semiderruido. Aunque durante la última etapa del reinado de Carlos III, se realizó según una Real Orden la reparación inmediata del puente.

El puente es una obra realizada en piedra arenisca de color rojizo. Consta de 7 arcos de medio punto y una longitud de 125 metros, alcanzando una altura desde la base del cauce de 25 metros en su arco principal y una anchura de 6 metros.

3.1.2 Clima de la zona de estudio

Los parámetros climatológicos medidos en el poblado de Marmolejo, localizado en la cuenca del Río Guadalquivir (ver Figura 3.1), muestra claramente las características de un clima mediterráneo definido por un carácter templado-cálido de sus temperaturas y por la aleatoriedad de sus precipitaciones. Dicho clima es característico de toda la zona sur de España y la costa del mediterráneo y responsable de las condiciones extremas presentes.

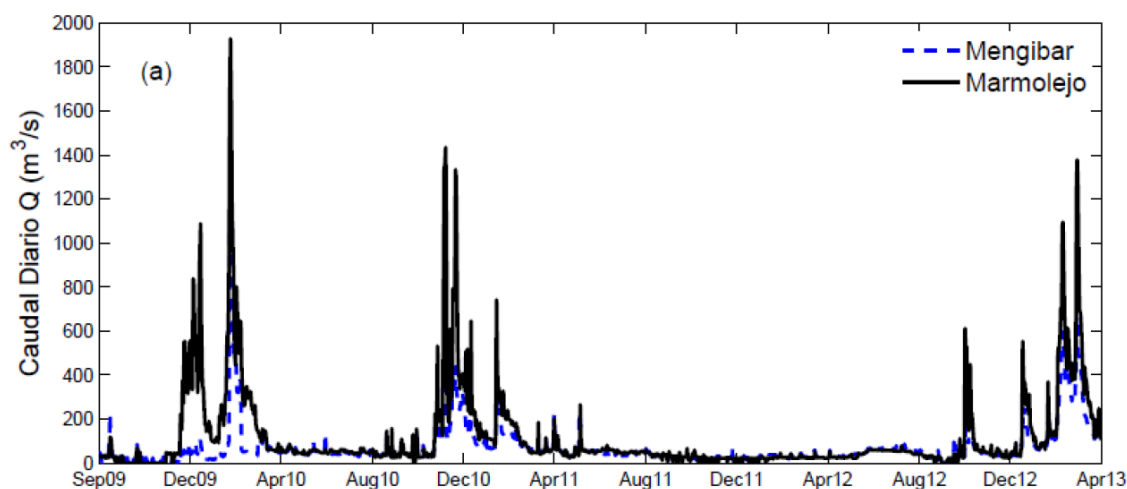


Figura 3.12. Caudal diario medido en la presa de Marmolejo y Mengibar en los años 2009-2013. [8]

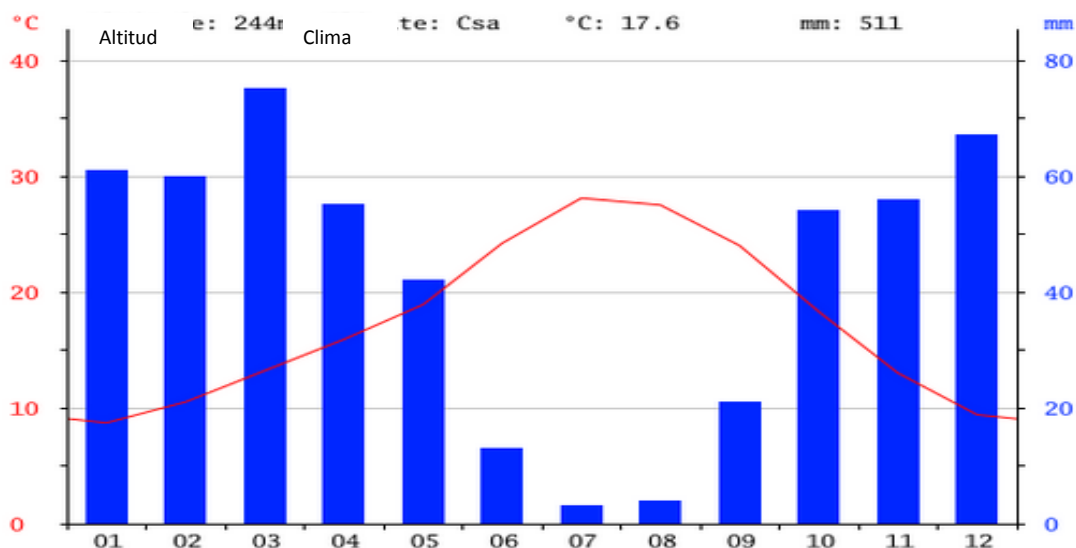


Figura 3.13. Diagrama de temperatura y precipitaciones en Marmolejo. [8]

La temperatura media anual de Marmolejo, según se puede apreciar en la Figura 3.13, es de 17.9 °C y la precipitación media anual es de 511 mm por metro cuadrado, predominando las altas temperaturas y las condiciones generalmente secas. Estas condiciones climáticas se deben a la topografía de la localidad, situada cerca de la cuenca del Río Guadalquivir y cercana al Parque Natural Sierra de Cardeña y Montoro.

Como podemos observar en la Figura 3.12, la humedad, normalmente transportada por los vientos provenientes del Suroeste, conlleva una mayor precipitación anual en las cercanías de las cadenas montañosas de Parque Natural Sierra de Cardeña y Montoro provocando una mayor precipitación y aumento del caudal entre los meses de diciembre y abril, produciéndose un mayor caudal en el mes de marzo.

Estas condiciones hacen que la apertura de compuertas se produzca durante la época en la que nos encontramos, en la estación invernal, ya que es cuando mayor cantidad de agua se puede alcanzar en el embalse.

3.2 Modelo Digital de Elevaciones

La Figura 3.14, que se ve a continuación, muestra una vista en planta del Modelo Digital de Elevaciones, con su correspondiente leyenda de cotas. Donde podemos comprobar que la pendiente no es demasiado grande. Se puede localizar a simple vista la presa que induce un desnivel de 12 metros entre la elevación de la lámina de agua en su tramo aguas arriba y debajo de la presa.

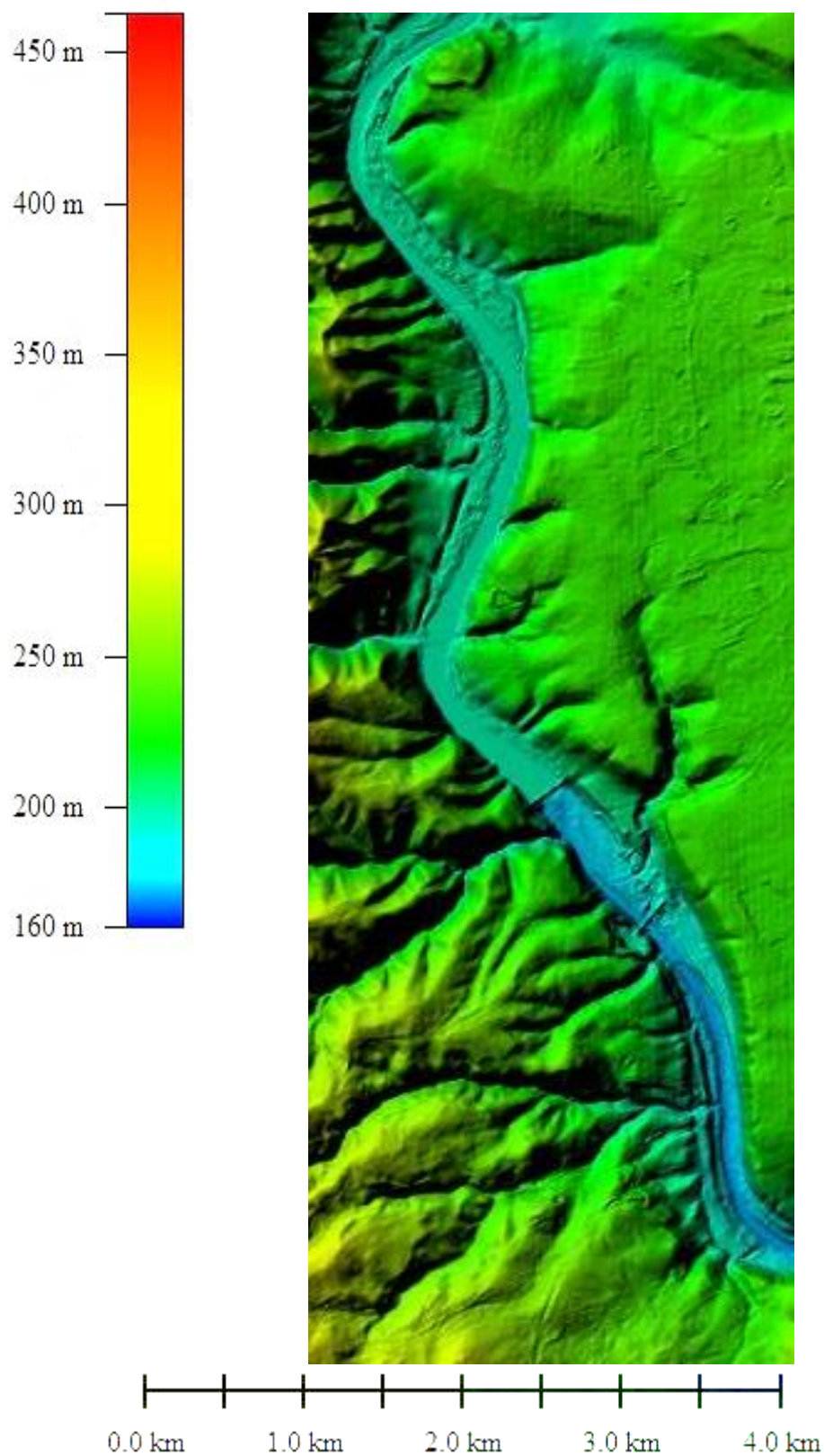


Figura 3.14. Modelo Digital del Elevaciones sin batimetría. [7]

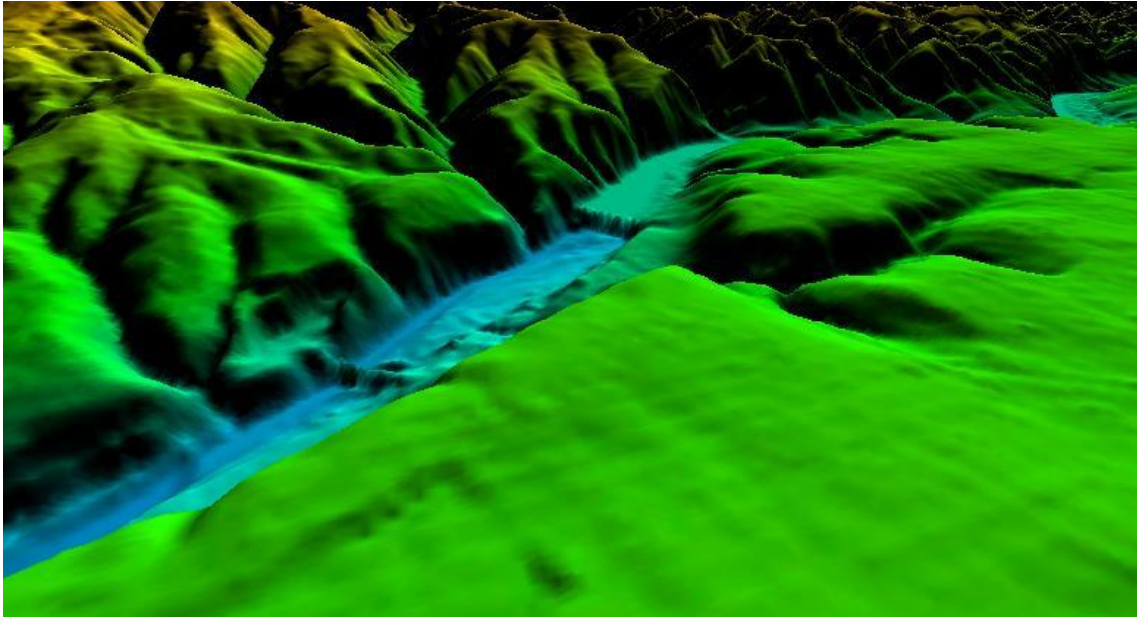


Figura 3.15. Modelo Digital de Elevaciones 3D de la zona de estudio.

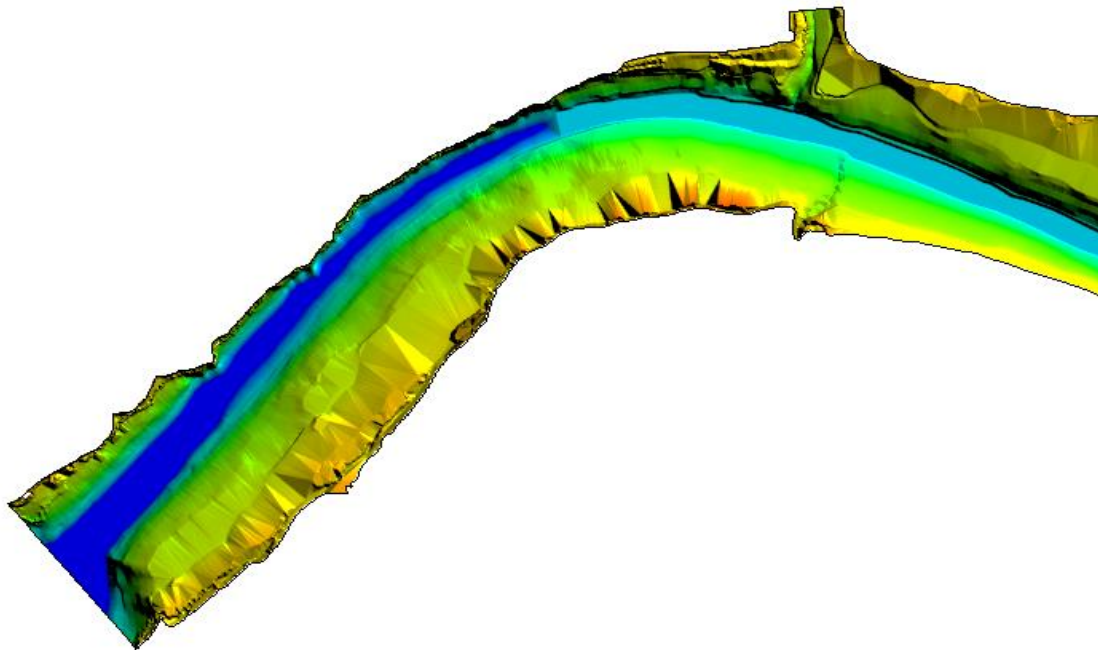


Figura 3.16. Modelo Digital de Elevaciones con la batimetría aplicada.

A continuación, se desgranará algo más este Modelo Digital de Elevaciones, y se comprobará la gran precisión y potencial que tiene este modelo y cómo esto hará que se pueda realizar una simulación mucho más fiel a la realidad.

Para comprobar dicha precisión, se realizarán unas secciones claves sobre la ortofoto, utilizando el software adecuado para ello; véase el software Global Mapper como ejemplo, y se representarán gráficamente las distintas cotas que nos proporciona este modelo. Pero primeramente, antes de mostrar las secciones, se va a comentar dos detalles relevantes en cuanto al Modelo Digital de Elevaciones.

La Figura 3.15 mostrada anteriormente es un zoom de la zona de estudio, que si es comparada con la Figura 3.5, se llega a la conclusión de dos cosas que no se pueden dejar pasar por alto:

- La primera es que el Modelo digital de Elevaciones nos muestra una precisión de en torno a un metro en las direcciones x e y, lo que quiere decir que cualquier elemento de dimensiones iguales o superiores a un metro lo representará. Esta precisión se puede observar visualizando la Figura 3.14 donde se detecta la cúpula del balneario de Marmolejo, lo que hace una idea del detalle mostrado.
- La segunda cosa que tenemos que describir es el puente estudiado en el subtramo 3. El Modelo Digital de Elevaciones se ha obtenido directamente de la vista aérea, es decir, interpreta que la altura del río en ese punto es la del puente. Esto se puede apreciar en la Figura 3.15, aunque no entraremos en detalle porque no se estudia en nuestro proyecto. Solo destacar que para solucionar esto se implementa un código que permite restablecer la altura interpolando entre la altura de antes y después del puente.

A continuación, se puede observar la Figura 3.17, donde se hace un corte general longitudinal del río a su paso por la presa, para ver como desciende la altura a lo largo del recorrido y observar la pendiente de este.

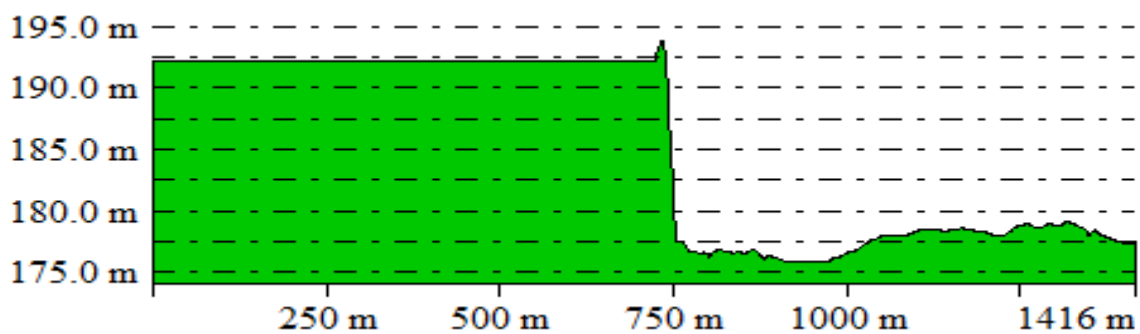


Figura 3.17. Cotas a lo largo del río Guadalquivir a su paso por la presa de Marmolejo. [7]

La Figura 3.17 constituye solamente el paso del río Guadalquivir por la presa de Marmolejo, como se aprecia en la ilustración, la lámina superficial del río aguas arriba proviene a una altura de 190 metros hasta la llegada a la presa donde se puede observar que el nivel del río desciende hasta aproximadamente unos 178 metros, se produce un salto de 12 metros.

Ahora se pasará a realizar unos cortes transversales, en el subtramo 2 o subtramo de estudio descrito anteriormente. El primer corte se realiza aguas arriba de la presa de Marmolejo, antes de llegar a las compuertas de la presa.

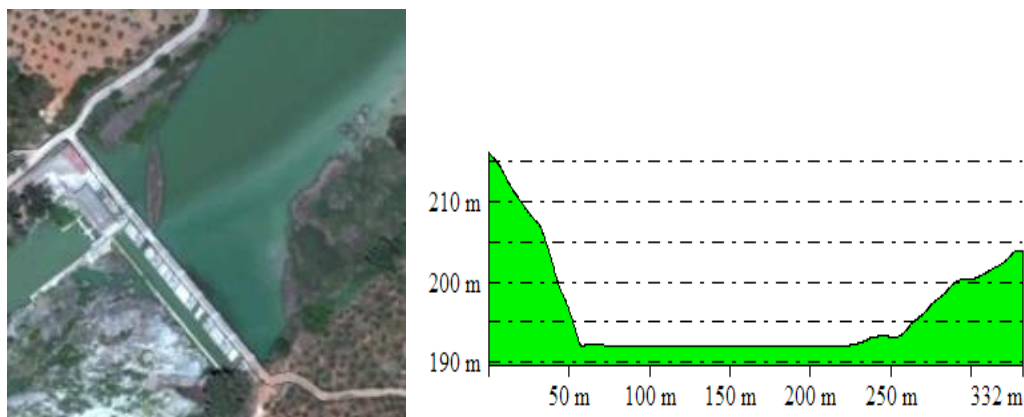


Figura 3.18. A la izquierda vista aérea aguas arriba de la presa de Marmolejo y derecha su sección transversal. [6] [7]

En la Figura 3.18 se observa que el nivel del cauce es parejo, esto se debe a que el agua del embalse está en reposo. Como se observa en las dos ilustraciones anteriores el margen derecho del río es donde se encuentra una mayor concentración de lodos.

Por último, se va hacer un corte en el segundo tramo del subtramo 2 puesto que el subtramo 3 no es de estudio. Este corte se realizará a la altura de la entrada del arroyo de las Graillas que se encuentra a un lado del río, para ver cómo puede afectar para el nivel de sedimentación.

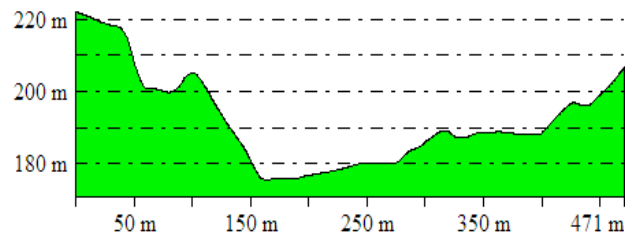


Figura 3.19. A la izquierda vista aérea aguas abajo de la presa de Marmolejo y derecha su sección transversal.

En la figura se ve cómo se ha dado el corte, y las correspondientes cotas de toda la sección, de las cuales nos interesan las que van desde los 150 metros hasta los 350 metros donde se incorpora al cauce el arroyo ya mencionado. Como podemos observar el arroyo proviene de una zona más alta a la que se encuentra el cauce del río lo que puede provocar que exista mayor sedimentación en la parte donde vacía el arroyo. Como se observa en el panel de la derecha de la Figura 3.19 existe una mayor irregularidad que en las demás secciones realizadas anteriormente, esto indica que tiene mayor cantidad de sedimentos sobre todo en la desembocadura del arroyo.

En resumen, en este capítulo se han presentado dos grandes temas: por un lado se ha presentado los subtramos en los que se divide nuestro estudio y la problemática creciente que encontramos en cada zona, tanto en el cauce como en sus inmediaciones; y por otro lado, se ha descrito el Modelo Digital de Elevaciones disponible para la zona y la precisión que ofrece.

4. Pre-, Pos-, Procesado

El capítulo actual trata sobre la simulación numérica de la dinámica fluvial del río Guadalquivir a su paso por la presa de Marmolejo. Se pretende obtener la evolución temporal del campo de velocidad y altura durante una crecida típica del caudal que circula por la presa de Marmolejo. El interés de dicho cálculo reside en la posibilidad de calcular a posteriori el movimiento de la sedimentación a su paso por la presa a simular. Dicho estudio queda fuera de nuestras competencias.

La relevancia de la predicción de la carga de fondo o flujo másico de sedimento reside en el hecho de que, debido al cambio climático, el caudal del río puede aumentar en los futuros años venideros debido a las lluvias cada vez más torrenciales. Estas provocarán la erosión de una mayor cantidad de sedimento pudiendo perjudicar las inmediaciones del río, y al propio cauce del río que afectaría a la presa en estudio.

Para la realización de dicho estudio haremos uso, de un código propio en el que desarrollamos la malla de la zona de estudio, que comentaremos en secciones 4.2 y 4.3. Así como el software Dassflow-Hydro 2.0, proporcionado por el Instituto Nacional de Ciencias aplicadas de Toulouse (Francia) en colaboración con la Escuela Politécnica Federal de Lausana (Suiza) y la Universidad de Jaén.

Iniciaremos este capítulo describiendo las ecuaciones bidimensionales de aguas someras, las cuales integraremos numéricamente en Dassflow. Seguidamente se realizará una descripción de todo el preprocesado, procesado para la simulación 2D y el pos procesado.

4.1 Modelado bidimensional del flujo

4.1.1 Ecuaciones de SAINT-VENANT

El modelo de Saint-Venant en 2D para aguas someras es utilizado cuando la profundidad del cauce es pequeña, es decir, aquellos en los que las medidas horizontales son mayores que las verticales. En estos conjuntos de flujos están los ríos en planicies, presas o lagunas y escurrimientos.

Por estos motivos, la capacidad de reproducir fenómenos complejos (zonas de recirculación, expansión y contracción en el flujo), y capturar de manera natural resaltos hidráulicos, entre otros, utilizamos el modelo de aguas someras para nuestra simulación.

El modelo de Saint-Venant para aguas someras es un modelo proveniente del modelo de Navier-Stokes en 3D para fluidos incompresibles. A partir de este modelo se realiza un promedio en el tiempo para las variables de interés llegando al modelo de Saint-Venant 2D.

Hay que tener en cuenta las hipótesis más importantes para la deducción del modelo de Saint-Venant, en las cuales encontramos que la pendiente del fondo debe ser pequeña, el movimiento de las partículas ocurren sobre planos horizontales y la distribución de la presión se considera hidrostática debido a que la curvatura de las líneas de corriente es pequeña.

Con lo explicado anteriormente, el modelo de Saint-Venant quedará definido mediante su forma conservativa (Toro, 2001):

$$\frac{d\mathbf{U}}{dt} + \frac{d\mathbf{F}(\mathbf{U})}{dx} + \frac{d\mathbf{G}(\mathbf{U})}{dy} = \mathbf{B}(\mathbf{U})$$

Donde x e y son las coordenadas espaciales, t es el tiempo, $\mathbf{U}$ es el estado del flujo, $\mathbf{F}$ y $\mathbf{G}$ son los vectores de flujo en las direcciones x e y , respectivamente, y $\mathbf{B}$ es el vector del término de fuente. Dichos vectores están definidos como siguen:

$$\mathbf{U} = (h, hu, hv)^T = (h, q_x, q_y)^T$$

$$\mathbf{F} = (hu, hu^2 + \frac{1}{2}gh^2, huv)^T$$

$$\mathbf{G} = (hv, huv, hv^2 + \frac{1}{2}gh^2)^T$$

$$\mathbf{B} = (0, gh(S_{0x} - S_{fx}), gh(S_{0y} - S_{fy}))^T$$

Donde h es la profundidad del agua, u y v son las componentes x e y de la velocidad, respectivamente, q_x y q_y son las componentes de descarga unitarias, y S_0 y S_f son el gradiente de elevación del cauce (o vector pendiente), y el coeficiente de fricción, respectivamente. Entre otras fórmulas posibles (como Darcy-Weisbach y Chezy), el término S_f puede ser evaluado mediante la fórmula de Manning, que viene dada por:

$$S_{fx} = \frac{n^2 q_x \sqrt{q_x^2 + q_y^2}}{h^{7/3}}, \quad S_{fy} = \frac{n^2 q_y \sqrt{q_x^2 + q_y^2}}{h^{7/3}}$$

Donde n es el coeficiente de Manning. Éste se suele evaluar en función del tamaño del grano (Dingman, 2009):

$$n = 0.0150 \times d_{50}^{1/6}$$

Donde d_{50} es el diámetro medio de grano expresado en milímetros.

Otra manera de evaluar el coeficiente de Manning es mediante tablas en función de parámetros relacionados con el cauce de un río y los posibles accidentes geográficos que se pueden dar y afectar a dicho cauce. Estos coeficientes se pueden encontrar en varios libros, donde viene descrito para distintos casos, facilitando la interpretación de los mismos (Dingman, 2009).

Sin embargo, para este proyecto no se entrará a describir los distintos coeficientes de Manning que podemos encontrar; para el estudio se ha establecido un valor de 0.03, utilizado generalmente para canales limpios, con bancos de arena y piedras en el fondo.

En el caso de meandros, como el descrito en el capítulo 3, no es necesario realizar ninguna modificación sobre el coeficiente de Manning, ya que se trata de un caso de simulación bidimensional y el campo de velocidad bidimensional directamente modela las posibles pérdidas.

Como hemos mencionado anteriormente, el coeficiente de Manning es empírico, es decir, mayoritariamente su valor no se puede medir, puesto que depende de variables como, vegetación, erosión, etc.

Las ecuaciones mostradas anteriormente, son ecuaciones en derivadas parciales de primer orden en tiempo y espacio, siendo la incógnita h , u , v . Son necesarias condiciones iniciales y de contorno para la resolución del sistema, aunque generalmente no existe solución analítica del problema. Ante esto, una opción es recurrir a los métodos numéricos.

Para nuestro estudio se realizará una simulación transitoria partiendo de una condición inicial tipo “lecho seco” e iremos introduciendo un caudal para ver el comportamiento que muestra el flujo frente la presa. En nuestro estudio incrementaremos el caudal de 0 a $2500 \text{ m}^3/\text{s}$ en un tiempo de 24 h. Este escenario es uno de los más extremos que han sido registrados durante fenómenos hidrológicos extraordinarios. A continuación, mostramos el hidrograma empleado en nuestro estudio.

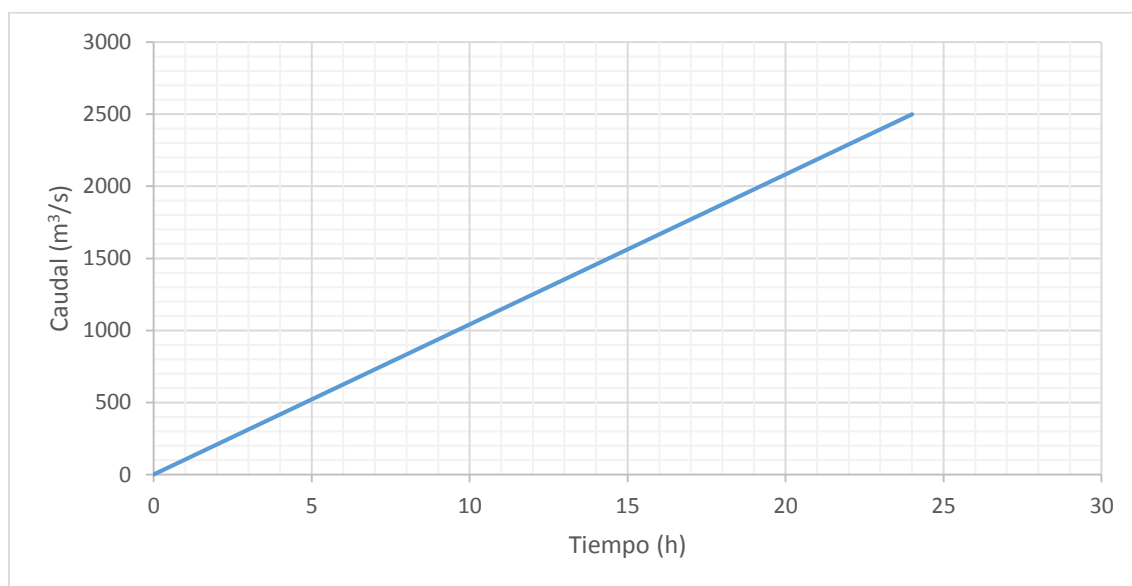


Figura 4.1. Hidrograma simulado.

Estos valores para el caudal se justifican mediante la Figura 3.12, situada en el capítulo de localización geográfica, y por la siguiente figura, donde se muestran los caudales medios diarios en respectivos años a lo largo del tiempo en que la presa en estudio se encuentra funcionando. Como podemos observar, en la Figura 4.2, existen años en los que se superó el caudal máximo representado, aunque no es usual, por lo que podemos decir que este valor es adecuado. Puesto que podemos usar la simulación para evitar daños en el entorno de la presa. Cabe destacar que estos valores suelen ocurrir en los meses de invierno, debido al clima tropical de la zona puesto que tenemos aire frío y temperaturas no muy bajas.

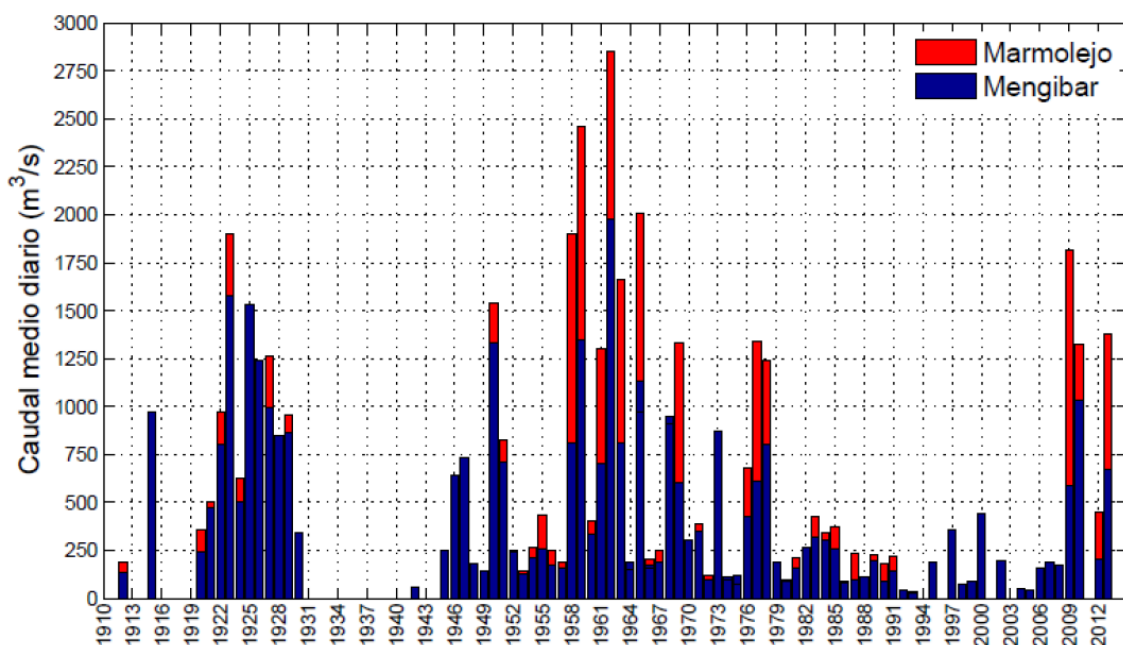
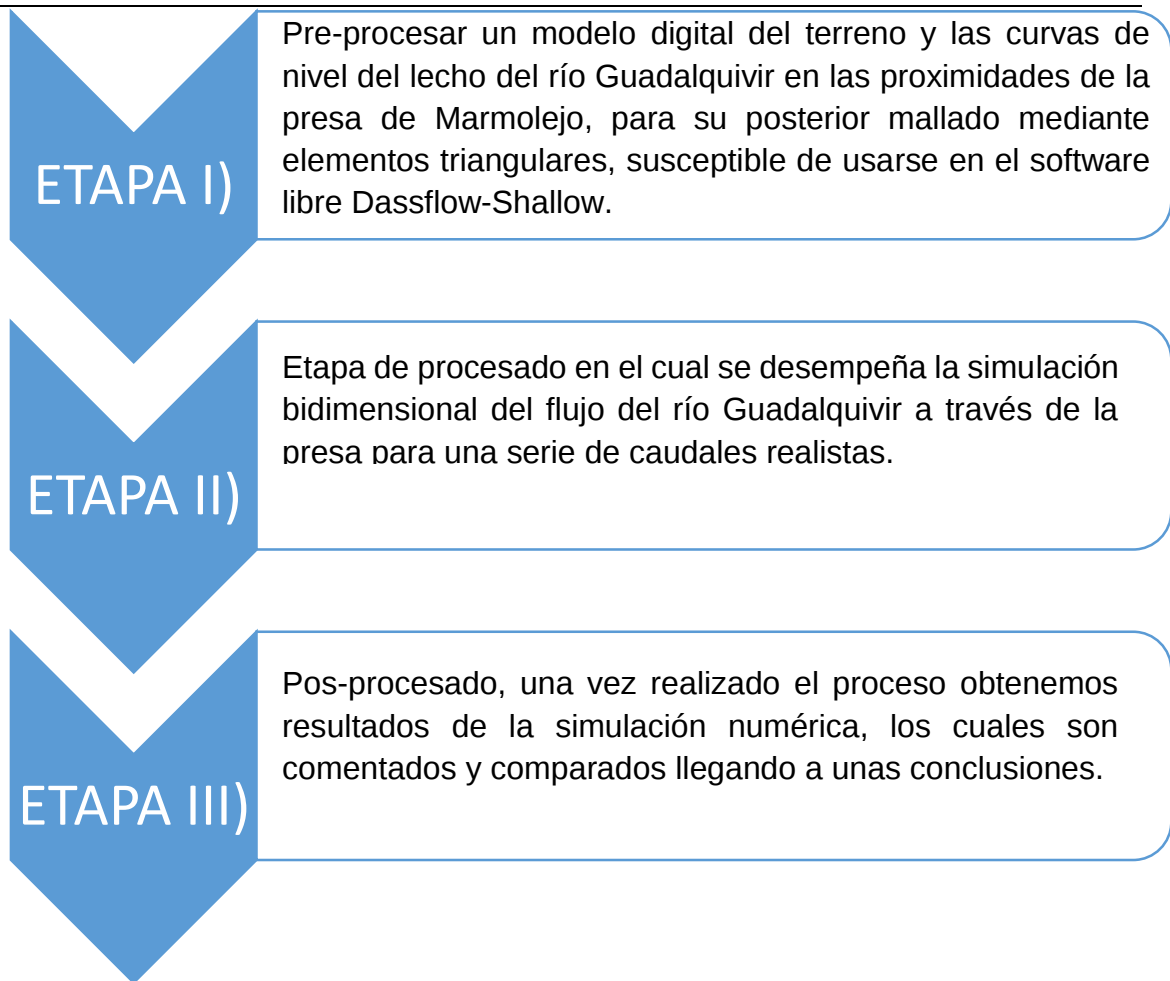


Figura 4.2. Caudal medio diario de la zona de estudio desde 1910 hasta 2012.

Tras esta explicación pasaremos a introducir mediante un diagrama de bloques el proceso seguido para este proyecto. El diagrama de bloques sintetiza las etapas seguidas para poder obtener unos resultados fiables, que serán expuestos en un capítulo posterior.



4.2 Preprocesado

Antes de realizar la simulación numérica se presentarán los pasos seguidos antes de realizar el proceso, es decir, el preprocesado, donde describiremos como actuamos y escogemos la zona de estudio para simular; así mismo, explicaremos como mallamos el área de simulación y exportamos la misma para adecuarlo al programa mediante el cual realizaremos la simulación.

Primeramente para la zona de estudio acudimos al software GlobalMapper, mediante el cual definimos nuestra zona de estudio, basada en nuestra percepción de cuál es el área que afecta al estudio. Esta zona de estudio está definida y comentada en los capítulos 2 y 3. A continuación, mostraremos una figura 4.3 donde se observa la ortofoto del sitio de estudio y el área seleccionada para la simulación.



Figura 4.3. Ortofoto de la zona de estudio. [7]

Como se observa en la figura anterior, contemplamos el área de estudio bordeada en negro sobre la misma. Se selecciona el área de simulación más ajustada posible, teniendo en cuenta que durante la simulación el agua no desborde dicha área.

Tras definir el área de mallado, pasamos a la siguiente fase en la cual se procede al mallado para realizar la simulación numérica. Esta malla se realiza mediante el software de programación Matlab. Para definir ésta primeramente fijamos la geometría de las compuertas de la presa de Marmolejo. Para ello nos referenciamos en los planos suministrados por el tutor de este proyecto y mediante una visita al sitio de estudio, donde se toman las medidas de todas las características necesarias para la creación de la malla.

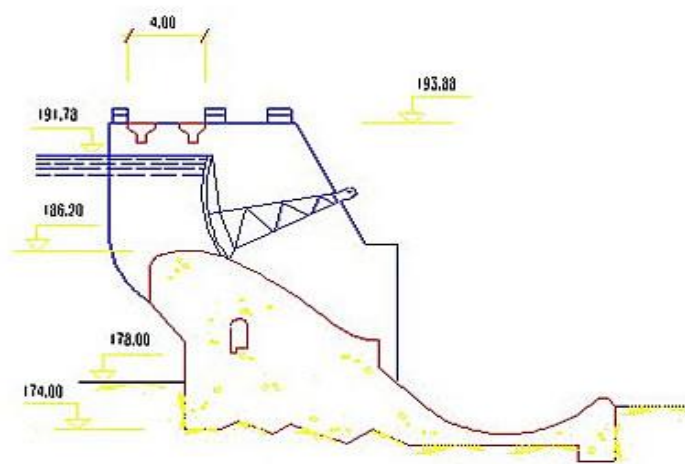


Figura 4.4. Perfil de la presa de estudio. [9]

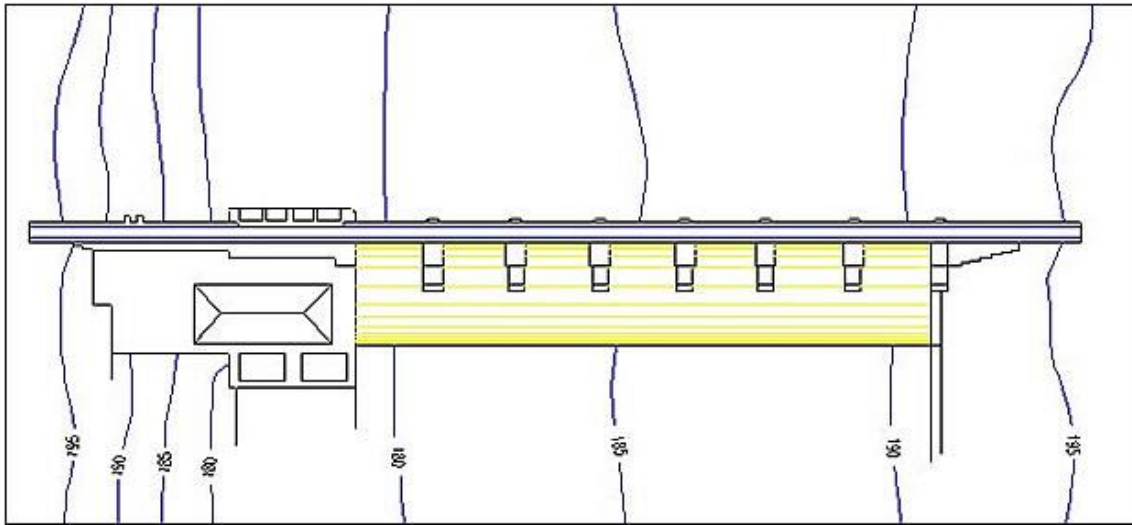


Figura 4.5. Planta de la presa de estudio.

A continuación, mostramos las primeras líneas del código realizado para la creación de la malla en el preprocesado.

```
% Realizamos las compuertas
L = 19;
H = 5; Hc = 26.5; lc = 57;
lm = 4.33;
nx = 21;
ny = 7;

% Partimos desde el origen (0,0)
x0 = 0;
y0 = 0;
```

El parámetro L denota la longitud que existe entre cada machón que separa una compuerta de otra; H y H_c son las distancias vista desde planta que definen el largo del machón y de la plataforma donde está situada la caseta, respectivamente; lc , y lm son, respectivamente, la anchura de la plataforma y del machón. Para la malla definimos n_x y n_y los cuales definen los nodos de la malla tanto en el eje x e y .

Seguidamente se mostrará la siguiente parte del código donde se ilustra la creación de la malla básica. A partir de la cual introduciremos más partes de la malla para terminar la geometría deseada, como los aliviaderos de la presa y la infraestructura que contiene la central hidroeléctrica.

```
% creación malla
y = y0+linspace(0,H,ny);
x = x0+linspace(0,L,nx);
yc = y0+linspace(0,Hc,ny);
xc = x0+linspace(0,L,nx);
dy = y(2) - y(1);
dx = x(2)-x(1);
[bXXc, bYYc] = meshgrid(xc,yc);
[bXX1, bYY] = meshgrid(x,y);
bXX1 = bXX1+L+lc+lm;
bXX2 = bXX1+L+lm;
bXX3 = bXX2+L+lm;
bXX4 = bXX3+L+lm;
bXX5 = bXX4+L+lm;
bXX6 = bXX5+L+lm;
bXX7 = bXX6+L+lm;
aumento = max(max(bXX7));
nx = 211;
yl = y0+linspace(0,H,ny);
xl = x0+linspace(aumento+dx,350,nx);
[bXX1, bYY1] = meshgrid(xl,yl);

clear nx
nx = 21;
```

Para la creación de la malla primeramente definimos cuatro vectores los cuales definen los espacios entre los machones y la plataforma, ya que la malla se realiza para ver el flujo del agua, y por lo tanto los machones y plataforma no serán mallados.

Tras la creación de los vectores se crean matrices que definen las mallas creadas en la zona de las compuertas, mediante el comando *meshgrid* que transforma los vectores primeramente creados en matrices.

Por ultimo tras el mallado de la zona a simular pasamos a darle forma a los elementos que forman dicha malla. En nuestro caso escogemos elementos triangulares muy útiles para este tipo de estudios. A continuación, se muestra esta parte del código donde realizamos la triangulación de cada bloque anterior por separado y la unión de estas triangulaciones.

```
% Triangularizamos cada bloque por separado
tric = delaunay(bXXc(:),bYYc(:));
tri1 = delaunay(bXX1(:),bYY(:));
tri2 = delaunay(bXX2(:),bYY(:));
tri3 = delaunay(bXX3(:),bYY(:));
tri4 = delaunay(bXX4(:),bYY(:));
```

```

tri5 = delaunay(bXX5(:),bYY(:));
tri6 = delaunay(bXX6(:),bYY(:));
tri7 = delaunay(bXX7(:),bYY(:));
tri1 = delaunay(bXX1(:),bYY1(:));

% Unimos las triangularizaciones
X = [bXXc(:); bXX1(:); bXX2(:); bXX3(:); bXX4(:); bXX5(:); bXX6(:);
bXX7(:); bXX1(:)];
Y = [bYYc(:); bYY(:); bYY(:); bYY(:); bYY(:); bYY(:); bYY(:); bYY(:);
bYY1(:)];
tri = tri1;
tri = [tri; tri1+1*nx*ny];
tri = [tri; tri2+2*nx*ny];
tri = [tri; tri3+3*nx*ny];
tri = [tri; tri4+4*nx*ny];
tri = [tri; tri5+5*nx*ny];
tri = [tri; tri6+6*nx*ny];
tri = [tri; tri7+7*nx*ny];
tri = [tri; tri1+8*nx*ny];
aux = max(max(bXX1))+dx:dx:min(min(bXX2))-dx;
aux = [aux , max(max(bXX2))+dx:dx:min(min(bXX3))-dx];
aux = [aux , max(max(bXX3))+dx:dx:min(min(bXX4))-dx];
aux = [aux , max(max(bXX4))+dx:dx:min(min(bXX5))-dx];
aux = [aux , max(max(bXX5))+dx:dx:min(min(bXX6))-dx];
aux = [aux , max(max(bXX6))+dx:dx:min(min(bXX7))-dx];
aux = [aux , max(max(bXX7))+dx:dx:min(min(bXX1))-dx];
aux1 = max(max(bXXc))+dx:dx:min(min(bXX1))-dx;
aux1 = max(max(bXX7))+dx:dx:min(min(bXX1))-dx;

clear bXX1 bXX2 bXX3 bXX4 bXX5 bXX6 bXX1 bXXm;
clear bYY tri1 tri2 tri3 tri4 tri5 tri6 tri7 tri1 tri1 bYYc bYYm trim;

X = [X ; aumento+0*aux1'];
Y = [Y ; aux1'];
indice = find( (X == max(max(bXX7(:))) | (X ==max(max(bXX7(:)))+dx)) );
tri2 = delaunay(X(indice),Y(indice));
tri3 = [indice(tri2(:,1)) indice(tri2(:,2)) indice(tri2(:,3)) ];
tri = [tri; tri3];
clear tri2 indice tri3 bXX7;

```

Para la triangularización de cada bloque utilizamos el comando *delaunay* en el cual hay que introducir vectores columna obteniendo una matriz que representa el conjunto de triángulos que compone la triangulación.

Seguidamente, unimos las triangulaciones realizadas, creando matrices *X* e *Y* mediante los arrays creados anteriormente con la función *meshgrid*; también unimos las triangulaciones y originamos puntos en el contorno de cada bloque para la posterior unión con la malla superior e inferior que establecemos posteriormente a estos pasos.

Para terminar la malla concretamos un bloque a la izquierda de las compuertas ya definidas, otro bloque superior que coja la superficie que queremos estudiar aguas arriba, por otro lado creamos otro bloque inferior que malle la parte de aguas abajo de la zona de las compuertas. Estos bloques se crean de la misma forma anteriormente descrita, aunque el paso de malla será distinto.

```
% Creamos bloque de la izquierda
Hi = Hc;
yi = y0+linspace(0,Hc,ny);
xi = -150:1.5*dx:min(min(bXXc));
[bXXi, bYYi] = meshgrid(xi,yi);
trii = delaunay(bXXi(:), bYYi(:));
auxi = max(max(bXXi))+dx:dx:min(min(bXXi))-dx;
aux = [aux , max(max(bXXi))+dx:dx:min(min(bXXc))-dx];
factor = max(max(bXXi));

% Juntamos y unimos ambas triangularizaciones
tri = [tri; trii+length(X)];
X = [X ; bXXi(:)];
Y = [Y ; bYYi(:)];
clear trii bYYi;
X = [X ; factor+0*auxi'];
Y = [Y ; auxi'];
indice = find( (X == max(max(bXXi(:))) | (X == min(min(bXXc(:))))) );
tri2 = delaunay(X(indice),Y(indice));
tri3 = [indice(tri2(:,1)) indice(tri2(:,2)) indice(tri2(:,3)) ];
tri = [tri; tri3];
clear tri2 indice tri3 bXXi;

% Creamos el bloque superior de igual H separado a una distancia dy
ndy = 1.5; ny = 21;
H2 = Hc-H-ndy*dy;
y2 = linspace(H+ndy*dy,H+ndy*dy+H2,ny);
x2 = L+lc+lm:dx:max(X);
[bXX2, bYY2] = meshgrid(x2,y2);
bXX2(1:2:end,2:end) = bXX2(1:2:end,2:end)-dx/2;
tri2 = delaunay(bXX2(:),bYY2(:));
auxx = max(max(bXXc))+dx:dx:min(min(bXX2))-dx;

% Juntamos y unimos ambas triangularizaciones
tri = [tri; tri2+length(X)];
X = [X ; bXX2(:)];
Y = [Y ; bYY2(:)];
clear tri2 bXX2 bYY2;
X = [X ; aux'];
Y = [Y ; H+0*aux'];
indice = find( (Y == H) | (Y==(H+ndy*dy)) );
tri2 = delaunay(X(indice),Y(indice));
tri3 = [indice(tri2(:,1)) indice(tri2(:,2)) indice(tri2(:,3)) ];
tri = [tri; tri3];
clear tri2 indice tri3;
finanterior = max(max(Y));
```

```

% Creamos otro bloque superior (bloque de la caseta)
H4 = 110;
ny = 46;
y4 = linspace(Hc+ndy*dy,H4+ndy*dy+Hc,ny);
x4 = min(X):dx:max(X);
[bXX4, bYY4] = meshgrid(x4,y4);
bXX4(1:2:end,2:end) = bXX4(1:2:end,2:end)-dx/2;
YY = bYY4(:);
z = 2*(YY-(min(YY)+max(YY))/2)/(-min(YY)+max(YY));
Lp = 40;
xmax = max(YY)-min(YY);
zm = 1+exp(-xmax/Lp);
xi = -Lp*log((zm-2)*z+zm)/2;
dyii = max(xi)-min(xi);
triii = delaunay(bXX4(:),xi);
for i = 1:length(xi)
    if xi(i)==0
        xi(i) = Hc+ndy*dy;
    else
        xi(i) = xi(i)+Hc+ndy*dy;
    end
end

% Juntamos y unimos ambas triangularizaciones
tri = [tri; triii+length(X)];
X = [X ; bXX4(:)];
Y = [Y ; xi];
clear tri4 bXX4 bYY4;
X = [X ; auxx'];
Y = [Y ; Hc+0*auxx'];
indice = find( (Y == finanterior) | (Y==(Hc+ndy*dy)) );
tri2 = delaunay(X(indice),Y(indice));
tri3 = [indice(tri2(:,1)) indice(tri2(:,2)) indice(tri2(:,3)) ];
tri = [tri; tri3];
clear tri2 indice tri3 YY xi;
finnaanterior = max(max(Y));

% Creación malla inferior con paso de malla constante.
ny = 41;
ndy = 15;
H7 = 650;
y7 = linspace(H4+ndy*dy+Hc,0+H7+ndy*dy,ny);
x7 = min(X):2*dx:max(X);
[bXX7, bYY7] = meshgrid(x7,y7);
bXX7(1:2:end,2:end) = bXX7(1:2:end,2:end)-dx;
tri7 = delaunay(bXX7(:),bYY7(:));
aux7 = min(min(bXX7))+2*dx:2*dx:max(max(bXX7))-2*dx;

% Juntamos y unimos ambas triangularizaciones
tri = [tri; tri7+length(X)];
X = [X ; bXX7(:)];
Y = [Y ; bYY7(:)];
clear tri7 bXX7 bYY7;
X = [X ; aux7'];
Y = [Y ; H4+0*aux7'];
indice = find( (Y == finnaanterior) | (Y==(H4+ndy*dy+Hc)) );
tri2 = delaunay(X(indice),Y(indice));
tri3 = [indice(tri2(:,1)) indice(tri2(:,2)) indice(tri2(:,3)) ];
tri = [tri; tri3];

```

```

clear tri2 indice tri3;
%Creamos bloque inferior mismo paso de malla que bloque superior
ndy = 1.5;
H3 = -25;
ny = 19;
y3 = linspace(0-ndy*dy,0+H3-ndy*dy,ny);
x3 = min(X):dx:max(X);
[bXX3, bYY3] = meshgrid(x3,y3);
bXX3(1:2:end,2:end) = bXX3(1:2:end,2:end)-dx/2;
tri3 = delaunay(bXX3(:),bYY3(:));

aux2 = min(min(bXX3))+dx:dx:max(max(bXX3))-dx;

% Juntamos y unimos ambas triangularizaciones
tri = [tri; tri3+length(X)];
X = [X ; bXX3(:)];
Y = [Y ; bYY3(:)];
clear tri3 bXX3 bYY3;
X = [X ; aux1'];
Y = [Y ; 0+0*aux1'];
X = [X ; aux'];
Y = [Y ; 0+0*aux'];
indice = find( (Y == 0) | (Y==(0-ndy*dy)) );
tri2 = delaunay(X(indice),Y(indice));
tri3 = [indice(tri2(:,1)) indice(tri2(:,2)) indice(tri2(:,3)) ];
tri = [tri; tri3];
clear tri2 indice tri3;
finanteriorr = min(min(Y));

% Creamos el bloque inferior de altura H3 separado a una distancia dy
ny = 43;
H5 = -130;
y5 = linspace(H3-2*ndy*dy,0+H5-ndy*dy,ny);
x5 = min(X):dx:max(X);
[bXX5, bYY5] = meshgrid(x5,y5);
bXX5(1:2:end,2:end) = bXX5(1:2:end,2:end)-dx/2;
YY = bYY5(:);
z = 2*(YY-(min(YY)+max(YY))/2)/(-min(YY)+max(YY));
Lp = 40;
xmax = max(YY)-min(YY);
zm = 1+exp(-xmax/Lp);
xi = Lp*log(((zm-2)*z+zm)/2);
dyi = max(xi)-min(xi);
trii = delaunay(bXX5(:),xi);
for i = 1:length(xi)
    if xi(i)==0
        xi(i) = H3-2*ndy*dy;
    else
        xi(i) = xi(i)+H3-2*ndy*dy;
    end
end

% Juntamos y unimos ambas triangularizaciones
tri = [tri; trii+length(X)];
X = [X ; bXX5(:)];
Y = [Y ; xi];
clear bXX5 bYY5 trii xi;
X = [X ; aux2'];

```

```

Y = [Y ; H3+0*aux2'];
indice = find( (Y == finanteriorr) | (Y==(H3-2*ndy*dy)) );
tri2 = delaunay(X(indice),Y(indice));
tri3 = [indice(tri2(:,1)) indice(tri2(:,2)) indice(tri2(:,3)) ];

tri = [tri; tri3];
clear tri2 indice tri3;
finnanterior = min(min(Y));

% Creación malla inferior con paso de malla constante.
ny = 41;
ndy = 15;
H6 = -650;
y6 = linspace(H5-ndy*dy,0+H6-ndy*dy,ny);
x6 = min(X):2*dx:max(X);
[bXX6, bYY6] = meshgrid(x6,y6);
bXX6(1:2:end,2:end) = bXX6(1:2:end,2:end)-dx;
tri6 = delaunay(bXX6(:),bYY6(:));
aux6 = max(max(bXX6))-dx:dx:min(min(bXX6))+dx;

% Juntamos y unimos ambas triangularizaciones
tri = [tri; tri6+length(X)];
X = [X ; bXX6(:)];
Y = [Y ; bYY6(:)];
clear tri6 bXX6 bYY6;
X = [X ; aux6'];
Y = [Y ; H5+0*aux6'];
indice = find( (Y == finnanterior) | (Y==(H5-ndy*dy)) );
tri2 = delaunay(X(indice),Y(indice));
tri3 = [indice(tri2(:,1)) indice(tri2(:,2)) indice(tri2(:,3)) ];
tri = [tri; tri3];
clear tri2 indice tri3;

```

Como se observa en el código anterior, para reducir el tamaño de la malla se crea tanto un bloque superior e inferior cuyo paso de malla se irá incrementando hasta que sea lo suficiente mente grande para mantenerlo constante y que no afecte a la simulación. Es decir, en la situación donde se encuentra las compuertas tendremos un paso de malla más pequeño, el cual se irá incrementando conforme nos vamos alejando de la zona de las compuertas.

Para realizar este código que nos permite ir incrementando el paso de malla realizamos un método numérico, llamado *Truncated Exponential Mapping (Semi-Infinite)*, con el cual queremos realizar un doble cambio de coordenadas para poder realizar el incremento en el paso de malla según las coordenadas de origen que tenemos.

Para el explicar cómo varía el paso de malla, explicaremos el método numérico. Mientras que las familias de polinomio ortogonales se definen

generalmente entre el dominio desde -1 hasta 1, los dominios unidimensionales pueden estar en un dominio arbitrario que puede ser finito, semi-infinito o toda la recta real. El mapeo seleccionado se emplea en los métodos espectrales clásicos, donde las asignaciones involucran solamente a variables escalares.

En nuestro caso, como hemos mencionado anteriormente, escogemos un dominio de intervalos semi-infinitos. Dentro de este tipo tenemos tres enfoques generales para tratar con estos intervalos; los cuales son: semi-infinite stretching, domain truncation and truncated stretching.

Para la realización de la malla se utiliza el método de Mapeo Truncado Exponencial (Truncated Exponential Mapping), el cual introduce tres variables x, ε, x_{max} , definidas por las siguientes ecuaciones:

$$x = -L \log\left(\frac{(\varepsilon_{max} - 2)\varepsilon + \varepsilon_{max}}{2}\right)$$

$$\varepsilon = \varepsilon_{max} - 2e^{-x/L}$$

$$\varepsilon_{max} = 1 + e^{-x_{max}/L}$$

Donde $\varepsilon \in [-1, 1]$, $x \in [0, x_{max}]$.

El parámetro N define el número de nodos que tiene la malla, cuanto mayor sea el valor de N mejor precisión obtendremos. La variable N nos condiciona el tercer parámetro mostrado anteriormente (x_{max}).

Para este caso, nosotros partimos de los valores mínimo y máximo del eje donde queremos que vaya variando el paso de malla, y definiendo la siguiente fórmula que nos permite realizar el cambio de variable a ε cuyo dominio irá comprendido en los valores mostrados anteriormente en el método.

A continuación, definimos la variable x_{max} que representa la diferencia entre el valor máximo y mínimo de la malla. Al finalizar estos pasos y definidas las variables necesarias sustituimos en las ecuación descritas anteriormente, aunque primeramente hay que definir L. L es una constante con la cual definimos la escala de longitud del mapeo.

Tras obtener los pasos de malla deseados, tenemos que trasladarlo al código para hacer que coincida con nuestra malla ya creada. Para esto, solamente tendremos que sumar el valor mínimo del eje donde se produce el paso variable. De esta forma es como conseguimos el paso de malla variable.

Por último, hay que representar el mallado de la zona a simular para comprobar que todo está correcto y tenemos una malla adecuada para la simulación. A continuación, mostramos la última parte del código que muestra los resultados finales. Guardamos estos resultados para usarlos en el código que define las elevaciones a los puntos de nuestra malla.

```
figure  
tripplot(tri,X,Y)  
daspect([1 1 1])  
save malla tri X Y;  
clear all
```

Una vez ejecutado el código, obtenemos la siguiente malla que, a continuación, se observa en la Figura 4.6, donde mostramos la parte central del sitio de estudio. Como se puede detectar, la zona de las compuertas tiene definida una malla más fina con la que poder hacer que los datos de la simulación sean lo más próximos a la realidad. Conforme nos alejamos de esta zona el paso de malla es mayor.

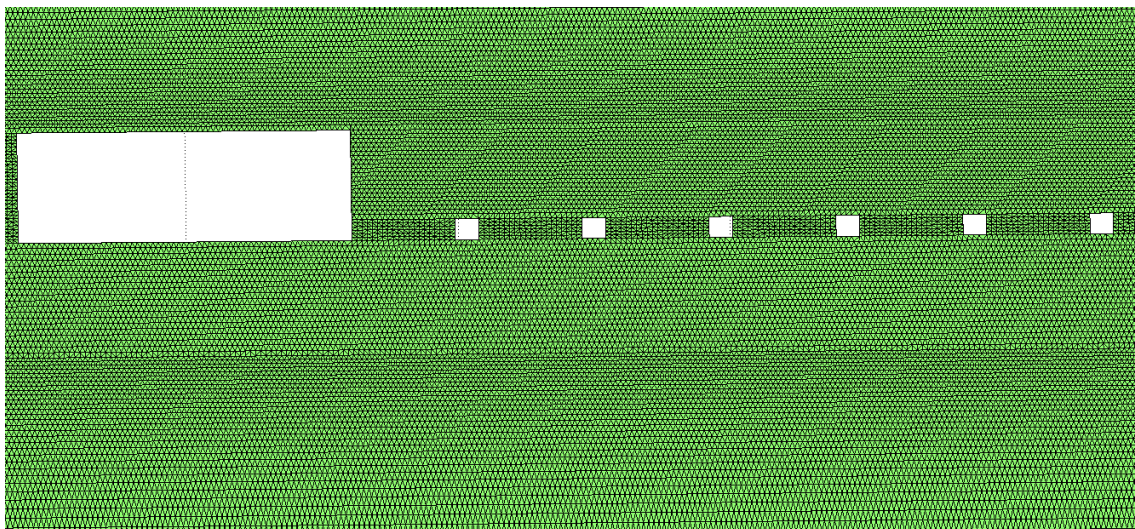


Figura 4.6. Malla realizada para simulación.

Cuando terminamos de definir la malla, ésta es orientada y direccionada sobre el Modelo Digital de Elevaciones, para poder aplicar la elevación y realizar

la simulación. Para ello realizamos un código mediante el software de programación Matlab como en el caso de la generación de la malla.

Mediante este código superponemos la malla a la zona de estudio, la malla se superpone de la misma manera que se obtiene anteriormente, es decir, horizontalmente por lo cual hay que realizar un giro. Para ello utilizamos las ecuaciones escritas de forma matricial:

$$\begin{pmatrix} x \\ y \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \cos \alpha & -\sin \alpha \\ \sin \alpha & \cos \alpha \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \zeta \\ \eta \end{pmatrix}$$

Este giro se realiza tomando puntos desde el software GlobalMapper para hacer coincidir los machones con la realidad sobre la zona de estudio. Una vez acometido el giro, lo que se lleva a cabo es la aplicación de la profundidad a los puntos de la malla creada. Para ello utilizamos la función *quinterp2* desarrollada por el software Matlab. La función *quinterp2* se utiliza para interpolar la elevación de los nuevos puntos de la malla a partir del Modelo digital de Elevaciones proporcionado por el tutor, aquí podemos distinguir las elevaciones sin batimetría y con ella. A continuación, se muestra el código desarrollado para estas funciones descritas.

```
% primera manera: Manual

clear all;
close all;

dem=dlmread('DEM.asc',' ',6,0);
dem(dem== -9999)=NaN;
dem=flipud(dem);
[m n] = size(dem);
x0 = dlmread('DEM.asc',' ', [2 1 2 1]);
y0 = dlmread('DEM.asc',' ', [3 1 3 1]);
res = dlmread('DEM.asc',' ', [4 1 4 1]);
[XX,YY] = meshgrid(0:n-1,0:m-1);
XX = x0 + XX*res;
YY = y0 + YY*res;
figure
surf(XX,YY,dem,'LineStyle','none')
figure
contourf(XX,YY,dem,50,'LineStyle','none')
daspect([1 1 1])

load malla ;

hold on;
p1 = [396008.653, 4213171.769];
p2 = [396087.276, 4213074.764];
```

```

plot([p1(1) p2(1)], [p1(2) p2(2)], 'w-', 'LineWidth', 3)
angulo = 1.25*atan((p1(2)-p2(2))/(p2(1)-p1(1)))*180/pi;
p3 = [396043.425, 4213132.347]; %punto medio.
p4 = [(146+150.3)/2 -2.5];

Y = -Y;
xi = X + p3(1)-p4(1);
eta = Y + p3(2)-p4(2);

Xg = (xi - p3(1))*cos(-angulo) - (eta - p3(2))*sin(-angulo) + p3(1);
Yg = (xi - p3(1))*sin(-angulo) + (eta - p3(2))*cos(-angulo) + p3(2);

hold on;
triplot(tri, Xg, Yg)
daspect([1 1 1])

Z=qinterp2 (XX, YY, dem, Xg (:), Yg (:), 2);
P(:,1) = X;
P(:,2) = Y;
P(:,3) = Z;
figure
trisurf(tri, P(:,1), P(:,2), P(:,3))
daspect([1 1 1])

```

A continuación, se muestran los resultados obtenidos mediante este código, en los cuales podemos ver la zona de estudio en tres dimensiones, con los datos de profundidad interpolados con la función *qinterp2* ya mencionada anteriormente; así como la posición de la malla una vez realizado el giro.

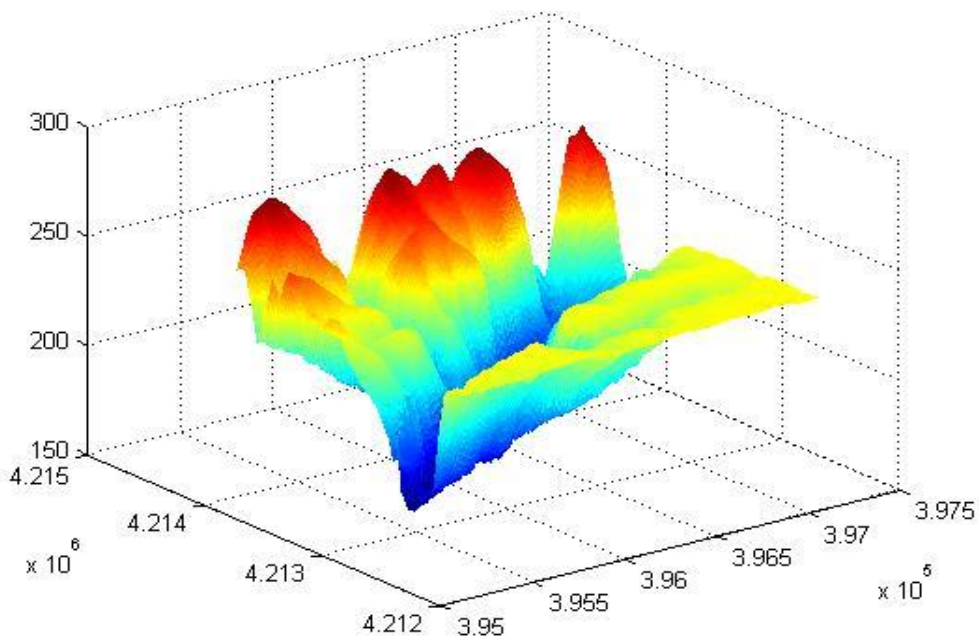


Figura 4.7. Zona de estudio tridimensional.

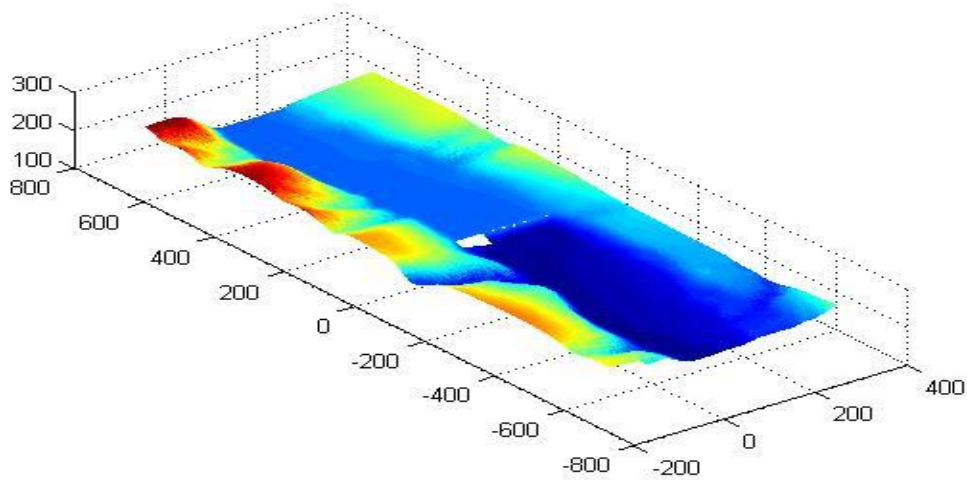


Figura 4.8. Zona de estudio tridimensional.

El código que se ha mostrado anteriormente es creado sin tener en cuenta la batimetría, es decir, sin contar con las cotas que realmente tiene el terreno de la zona de estudio. Tras la realización de este algoritmo y comprobar que funciona mostramos el código donde si se tiene en cuenta la batimetría, para esto se modifica el algoritmo anterior e introducimos unas líneas nuevas para describir la batimetría.

La primera parte del algoritmo, como podemos observar es de la misma forma que la anterior donde no se tiene en cuenta la batimetría, la diferencia viene a continuación, donde sí introducimos la batimetría del lugar de estudio.

```
dem=dlmread('batimetria.asc',' ',6,0);
dem(dem==-9999)=NaN;
dem=flipud(dem);
[m n] = size(dem);
x0 = dlmread('batimetria.asc',' ', [2 1 2 1]);
y0 = dlmread('batimetria.asc',' ', [3 1 3 1]);
res = dlmread('batimetria.asc',' ', [4 1 4 1]);
[XX,YY] = meshgrid(0:n-1,0:m-1);
XX = x0 + XX*res;
YY = y0 + YY*res;
Zbati=qinterp2(XX,YY,dem,Xg(:),Yg(:),2);
p(isfinite(Zbati),3) = Zbati(isfinite(Zbati));
correccion = (p(:,3) > 186.2) & (pold(:,2)>-20) & (pold(:,2)<10) &
(pold(:,1)<235) & (pold(:,1)>50);
p(correccion,3) = 186.2;
% Primera compuerta
correccion = (pold(:,2)>=-5) & (pold(:,2)<0) & (pold(:,1)<125) &
(pold(:,1)>100);
```

```

p(correccion,3) = 194; %191.7;
% Tercera compuerta
correccion = (pold(:,2)>=-5) & (pold(:,2)<0) & (pold(:,1)<172) &
(pold(:,1)>148);
p(correccion,3) = 194; %191.7;
% Quinta compuerta
correccion = (pold(:,2)>=-5) & (pold(:,2)<0) & (pold(:,1)<218) &
(pold(:,1)>196);
p(correccion,3) = 194; %191.7;

figure
trisurf(tri,p(:,1),p(:,2),p(:,3))
daspect([1 1 .5])

geodassflow;

```

La principal diferencia entre ambos códigos que podemos observar es el archivo “.asc” donde en este último código viene definido por los valores predeterminados proporcionados por el tutor del proyecto; los documentos proporcionados “DEM.asc” y “batimetría.asc” son los parámetros de entrada del Modelo Digital de Elevaciones en formato ASCII. Las siguientes líneas se realizan para dar un mismo valor de altura a las compuertas, puesto que en la realidad se encuentran a la misma cota.

Por último explicaremos el programa “geodassflow.m” en el cual encontramos: el algoritmo donde construimos el contorno de la malla, reorganizando los triángulos de los que ésta se compone. Y el script que escribe la malla y las condiciones de contorno en un archivo formato Dassflow para su posterior procesamiento en la siguiente etapa.

```

% CONSTRUCT THE BOUNDARY OF THE MESH BY REORDING THE TRI

t = tri;
v12 = (p(t(:,2),1)+p(t(:,2),2)*sqrt(-1)) -
(p(t(:,1),1)+p(t(:,1),2)*sqrt(-1)));
v13 = (p(t(:,3),1)+p(t(:,3),2)*sqrt(-1)) -
(p(t(:,1),1)+p(t(:,1),2)*sqrt(-1)));
negativos = find(sign(real(v12).*imag(v13)-real(v13).*imag(v12))<0);
tri(negativos,2) = t(negativos,3);
tri(negativos,3) = t(negativos,2);
[e,bnde] = getedges(tri,size(p,1));
bnd = find(bnde);
ejes_bnd = e(1:sum(bnde),:);
clear t negativos;
k=1;

```

Esta parte del programa organiza la unión de los nodos de la malla en sentido horario, puesto que el software Matlab triangulariza y ordena los triángulos de la malla aleatoriamente, es decir, los triángulos pueden estar unidos del nodo 1 al 2, y éste al 3, o el 1 al 3, y éste al 2; mientras que para el software Dassflow deben estar organizados en sentido horario.

Los triángulos que cumplan la condición anterior se quedarán tal cual, mientras que para los que estén aleatoriamente hará una permuta entre los nodos 2 y 3. Por otro lado, con el comando “getedge” nos proporciona las celdas frontera, es decir, las celdas donde definimos condiciones de contorno. La siguiente parte del código, pretende obtener qué celdas se encuentran estrictamente en la frontera, almacenando dicha información.

```
for i=1:length(bnd)
    bool1 = find(tri(:,1) == ejes_bnd(i,1));
    bool2 = find(tri(:,2) == ejes_bnd(i,1));
    bool3 = find(tri(:,3) == ejes_bnd(i,1));
    bool123 = [bool1; bool2; bool3];
    bool1a = find(tri(bool123 ,1) == ejes_bnd(i,2));
    bool2a = find(tri(bool123 ,2) == ejes_bnd(i,2));
    bool3a = find(tri(bool123 ,3) == ejes_bnd(i,2));
    if length(bool1a==1)
        celdas_fontera(k,1) = bool123(bool1a);
        if (tri(celdas_fontera(k,1),2) == ejes_bnd(i,1))
            nodos(k,:) = [1 2];
        elseif (tri(celdas_fontera(k,1),3) == ejes_bnd(i,1))
            nodos(k,:) = [3 1];
        else
            fprintf('Error');
        end
        k = k + 1;
    elseif length(bool2a==1)
        celdas_fontera(k,1) = bool123(bool2a);
        if (tri(celdas_fontera(k,1),1) == ejes_bnd(i,1))
            nodos(k,:) = [1 2];
        elseif (tri(celdas_fontera(k,1),3) == ejes_bnd(i,1))
            nodos(k,:) = [2 3];
        else
            fprintf('Error');
        end
        k = k + 1;
    elseif length(bool3a==1)
        celdas_fontera(k,1) = bool123(bool3a);
        if (tri(celdas_fontera(k,1),1) == ejes_bnd(i,1))
            nodos(k,:) = [3 1];
        elseif (tri(celdas_fontera(k,1),2) == ejes_bnd(i,1))
            nodos(k,:) = [2 3];
        else
            fprintf('Error');
        end
        k = k + 1;
    else
```

```

        fprintf('Error');
    end
end
contorno = tri(celdas_fontera,:);
contornox = [];
contornoy = [];
for i=1:length(celdas_fontera)
    contornox = [contornox ; p(contorno(i,nodos(i,1)),1) ];
    contornoy = [contornoy ; p(contorno(i,nodos(i,1)),2) ];
end
figure
plot(contornox,contornoy,'.')
daspect([1 1 1])
hold on;
contornox = [];
contornoy = [];
for i=1:length(celdas_fontera)
    contornox = [contornox ; p(contorno(i,nodos(i,2)),1) ];
    contornoy = [contornoy ; p(contorno(i,nodos(i,2)),2) ];
end
plot(contornox,contornoy,'or')
hold off;

```

A continuación, tras la definición de las fronteras, es momento de asignarle la condición de contorno que le corresponda. En nuestro caso tendremos que diferenciar entre salida, entrada o pared. Estas tres variables serán las que definan las condiciones de contorno para nuestra simulación. Para clasificar las fronteras ejecutamos el siguiente algoritmo.

```

% WRITE MESH AND BCs TO FILE IN DASSFLOW FORMAT
t = tri; % idem
BC(:,1) = celdas_fontera;
BC(:,2) = nodos(:,1);
BC(:,3) = 3; %WALL
iin = 0;
ejes = [ 0 350 -40 40];
for i=1:length(celdas_fontera)
    BC(i,4) = ( p(t(celdas_fontera(i), nodos(i,1)),3) +
p(t(celdas_fontera(i), nodos(i,2)),3))/2 ;
    ycelda = (pold(contorno(i,nodos(i,1)),2) +
pold(contorno(i,nodos(i,2)),2)) / 2.0d0;
    xcelda = (pold(contorno(i,nodos(i,1)),1) +
pold(contorno(i,nodos(i,2)),1)) / 2.0d0;
    if (ycelda == max(pold(:,2)))
        BC(i,3) = 1; %INFLOW characteristic
        iin = iin + 1;
        zin(iin) = BC(i,4);
    elseif (ycelda == min(pold(:,2)))
        BC(i,3) = 2; %OUTFLOW trans
    elseif ( (xcelda > ejes(1)) & (xcelda<ejes(2)) & (ycelda>ejes(3))
& (ycelda<ejes(4)) )
        p(t(celdas_fontera(i), nodos(i,1)),3) = 194;
        p(t(celdas_fontera(i), nodos(i,2)),3) = 194;
        BC(i,4) = ( p(t(celdas_fontera(i), nodos(i,1)),3) +
p(t(celdas_fontera(i), nodos(i,2)),3))/2;
    end
end

```

```

end
figure
plot(zin)
stlwrite('marmolejoCompuertas.stl', t, p);

LISTACELDAS(:,1) = 1:length(t(:,1));
LISTACELDAS(:,2:4) = t;
LISTACELDAS(:,5) = t(:,1);
LISTACELDAS(:,6) = 1;
LISTACELDAS(:,7) = (p(t(:,1),3)+p(t(:,2),3)+p(t(:,3),3))/3;
LISTANODOS(:,1) = (1:length(p(:,1)))';
LISTANODOS(:,2:4) = p;
inflow = find(BC(:,3)==1);
length(inflow)
outflow = find(BC(:,3)==2);
length(outflow)
wall = find(BC(:,3)==3);
BCinflow = BC(inflow,:);
BCoutflow = BC(outflow,:);
BCwall = BC(wall,:);

```

De esta manera establecemos como defecto que toda la frontera es pared, y a continuación se procede a separar la entrada y salida. La asignación de la entrada y salida se realiza por comparación del valor de la coordenada y, si éste tiene un valor máximo, pertenecerá a la entrada, mientras que si es mínimo pertenecerá a la salida. Finalmente dicha información se almacena en un archivo con extensión .geo por medio del script que se muestra seguidamente.

```

fid = fopen(['marmolejoCompuertas.geo'],'w+');
count = fprintf(fid,'#Caso \n');
count = fprintf(fid, '%7d %7d %7d\n', [length(p(:,1)) length(t(:,1))
1]);
count = fprintf(fid,'#Lista de nodos\n');
for i=1:length(LISTANODOS(:,1))
    count = fprintf(fid, '%7d %15.8f %15.8f %15.8f\n',
LISTANODOS(i,:));
end
count = fprintf(fid,'#Lista de celdas \n');
for i=1:length(LISTACELDAS(:,1))
    count = fprintf(fid, '%7d %7d %7d %7d %7d %7d %15.8f\n',
LISTACELDAS(i,:));
%    count = fprintf(fid, '%5g %5g %5g %5g %5g %5g\n',
LISTACELDAS(i,:));
end
count = fprintf(fid,'#Condiciones de contorno \n');
count = fprintf(fid,'INLET %7d %7d \n',[length(BCinflow(:,1)) 0]);
for i=1:length(BCinflow(:,1))
    count = fprintf(fid, '%7d %7d %7d %15.8f\n',BCinflow(i,:));
end
count = fprintf(fid,'OUTLET %7d %7d \n',[length(BCoutflow(:,1)) 0]);
for i=1:length(BCoutflow(:,1))
    count = fprintf(fid, '%7d %7d %7d %15.8f\n', BCoutflow(i,:));
end
count = fprintf(fid,'WALL %7d %7d \n',[length(BCwall(:,1)) 0]);
for i=1:length(BCwall(:,1))

```

```
count = fprintf(fid, '%7d %7d %7d %15.8f\n', BCwall(i,:));
end
status = fclose(fid);
```

Para concluir, se escribe un fichero con la estructura correcta para una interpretación válida mediante el software Dassflow, de tal forma que en el fichero aparezcan primeramente los nodos, con sus respectivas coordenadas x , y , z . Seguidamente se muestra la lista de celdas con los nodos que forman éstas; y finalmente las condiciones de entrada, salida, y la pared.

4.3 Procesado

Una vez acabado el preprocesado, comenzamos con el procesado. En este capítulo realizamos la simulación numérica de la zona de estudio en la presa de Marmolejo y a partir del cual se obtendrá los resultados a comentar en el capítulo 5.

Dassflow es un software computacional libre diseñado para simulaciones hidráulicas de ríos y especialmente para la integración de datos variacionales (4D-VAR). Todos los archivos de origen están escritos en Fortran 2003.

El principal modelo se basa en las ecuaciones de aguas someras bidimensionales Saint-Venant que toman como datos de entrada tanto la elevación como el coeficiente de fricción (Manning-Strickler). Las variables conservativas son la profundidad del agua h y la descarga local $q = h\mathbf{u}$, donde $\mathbf{u} = (u, v)^T$ es el vector velocidad promediado en altura.

En un dominio computacional $\Omega \in \mathbb{R}^2$ y para un intervalo de tiempo $[0, T]$ las ecuaciones numéricas a resolver son:

$$\begin{cases} \partial_t h + \operatorname{div}(\mathbf{q}) &= 0 & \text{in } \Omega \times]0, T] \\ \partial_t \mathbf{q} + \operatorname{div} \left(\frac{\mathbf{q} \otimes \mathbf{q}}{h} + g \frac{h^2}{2} \right) &= -gh \nabla z_b - g \frac{n^2 \|\mathbf{q}\|}{h^{7/3}} \mathbf{q} & \text{in } \Omega \times]0, T] \end{cases}$$

Siempre que tengamos unas condiciones iniciales y de contorno, g es la magnitud de la gravedad, Z_b es la elevación del terreno y n el coeficiente de Manning-Strickler.

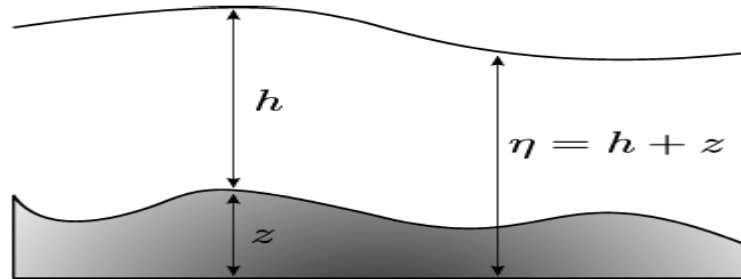


Figura 4.9. Variables numéricas. h profundidad del agua, z elevación del terreno y η distancia de la lámina de agua hasta superficie. [10]

Este modelo se puede resolver numéricamente por el método de volúmenes finitos considerando cualquier celda estructurada o no estructurada del dominio computacional. Varios esquemas numéricos se han aplicado y dando la posibilidad para usar globalmente un método de primer o segundo orden numérico de las soluciones con la propiedad bien equilibrada, es decir, Dassflow implementa un método numérico bien balanceado [3doc]. Se garantiza la conservación de la masa y la capacidad de preservar soluciones de estado estacionario.

El esquema numérico se basa en el método de S.K. Godunov [12] el cual fue modificado por J.-P. Vila y que implementa el método para el sistema de aguas someras en derivadas parciales, mejorándolo para garantizar la propiedad del método bien equilibrado.

En la Figura 4.10 se ilustra el logo de Dassflow, sus programadores y las entidades que participaron en la puesta a punto del software.



DASSFLOW v2.00.00 : User and Developer Guide

Frédéric Couderc^{*1}, Ronan Madec², Jérôme Monnier^{†2} and Jean-Paul Vila²

¹*CNRS, the Toulouse Mathematics Institute, Toulouse University.*

²*INSA, the Toulouse Mathematics Institute, Toulouse University.*

October 4, 2013

Figura 4.10. Información Dassflow. [10]

Como vemos en la figura 4.10 los creadores de este software son Frédéric Couderc, Ronan Madec, Jérôme Monnier y Jean-Paul Vila, todos ellos pertenecientes a la Universidad de Toulouse. DassFlow se basa en un artículo científico realizado por los mismos creadores de este.

A continuación, se describirán los ficheros que se implementan para el software Dassflow, en los cuales desarrollamos todo aquello que se ha descrito en la etapa de preprocesado para el software Matlab. Primeramente definiremos el documento “bc.txt”, seguidamente “hydrograph.txt” y para finalizar “input.txt”.

```
!=====
=====!
!  Number of boundary conditions
!=====
=====!
3
!=====
=====!
!  List of boundary conditions
!=====
=====!
1  discharg1  file
2  transm
3  wall
```

Este algoritmo hace referencia al código “bc.txt” en el cual definimos las condiciones de contorno. En él primeramente se indica el número de condiciones, en nuestro caso son tres, y a posteriori se indica el tipo. El primero

es la entrada de caudal el cual lee el caudal a simular. A continuación, introducimos la condición de contorno no reflectiva y para finalizar definimos la condición de pared.

Seguidamente, indicamos los caudales del hidrograma, para el cual definimos dos puntos en los cuales indicamos de que tiempo a que tiempo se realiza la simulación y el incremento del caudal. A continuación, se muestra el código “hydrograph.txt”.

```
!=====!
!  NumbEr of hydrograph
!=====!
1
!=====!
!  Hydrograph
!=====!
      2
      0.0000000e+00    1.0000000e+01
      8.6400000e+04    2.5000000e+03
```

Concluimos describiendo el código “input.txt”. Definimos los parámetros de simulación, parámetros numéricos y las constantes necesarias para realizar la simulación.

```
!=====!
!=====!
!      Input File for Shallow-Water Model
!      (configure your text editor with a 4 tabs space for better
!      reading)
!=====!
!=====!

&list_input

!=====!
!=====!
!  Mesh Type
!=====!
!=====!

      mesh_type =      'dassflow',
      ! 'basic' , 'dassflow'

      mesh_name =      'marmolejoCompuertas.geo',
      ! mesh name

!=====!
!=====!
```

```

! Simulation parameters
!=====
=====!

      ts          =      1.00000e+05,
      ! Simulation Time

      dt          =      1.d-2,
      ! Fixed Time Step

      dtw         =      1.d3,                      !
Output Result File Time Step

      dta         =      10.d0,
      ! Interval to generate the hydrograph

!=====
=====!
! Numerical parameters
!=====
=====!

      temp_scheme =      'euler',
      ! Choice of Temporal Scheme ( euler , rk2 )

      spatial_scheme =      'muscl_b1_b',
      ! Choice of Spatial Scheme ( first , muscl )

      adapt_dt    =      1,                      !
Choice of an Adaptative Time Step (1) or not (0)

      cfl         =      0.95,                      ! CFL
number in case of Adaptative Time Step

      heps        =      0.,                      !
Cut-off height to stabilize SW Numerical Schemes

      friction    =      1,                      !
Manning Source Term

!=====
=====!
! Physical parameters
!=====
=====!

      g           =      9.81,                      !
Gravity constant

!=====
=====!
! Output Results Files Switches
!=====
=====!

```

```

w_vtk      =      0,                                ! in
VTK format ( 1 -> ASCII , 2 -> Binary )
w_tecplot   =      1                                ! in
Tecplot ASCII format
/

```

En este fichero de texto se indica el nombre que toma la malla de entrada, en el cual definimos el tipo de malla y el nombre que se le da. Una vez definida la malla se concretan los parámetros de simulación, ts que es el tiempo de simulación, dt el paso de tiempo, dtw es el parámetro que define cada cuantos segundos se escribe un fichero de salida y por último dta que indica cada cuantos segundos se actualiza el caudal de entrada.

El esquema temporal que se trata de Euler explícito de primer orden, seguidamente el esquema espacial de segundo orden; este esquema lo define el método de elementos finitos MUSCL que pueden proporcionar soluciones numéricas de alta precisión para un sistema dado, incluso en los casos que presentan discontinuidades, o grandes gradientes.

Tras la definición de los esquemas, definimos otros parámetros numéricos, seleccionamos un paso de tiempo adaptativo, fricción y el número CFL el cual solo se usa si tenemos un paso de tiempo adaptativo. El número CFL se define $C = \frac{u \Delta t}{\Delta x}$, donde u es la velocidad, Δt es el intervalo de tiempo y Δx el intervalo de espacio. CFL es una condición de convergencia de ecuaciones diferenciales en derivadas parciales, como consecuencia, el paso de tiempo debe ser inferior a un cierto valor para una buena simulación.

Por último, para acabar se define la constante g (constante gravitacional) y todos los resultados de salida se guardan en archivos, tras la obtención de los resultados. Para poder interpretarlos se utilizará el software Tecplot, esta parte se realizará en el siguiente capítulo de pos procesado

5. Resultados

5.1 Compuertas abiertas

Tras realizar el Procesado, llegamos al Pos procesado donde discutimos los resultados, éstos se obtienen una vez llevada a cabo la simulación durante la primera etapa. Nuestro caso se trata de una simulación bidimensional, con lo cual este capítulo mostrará solamente gráficos bidimensionales.

Los resultados que se mostrarán primeramente, serán altura, Z_s (se trata la altura del terreno) y las componentes de la velocidad para las líneas de corriente. A continuación, mostraremos estos resultados para distintos intervalos de tiempo que se corresponde con caudales distintos de acuerdo con la Figura 4.1 situada en el capítulo 4.

Previo a la presentación de los resultados bidimensionales, se deben realizar una selección de los mismos. Ésta se realizará atendiendo al hecho de que nuestra simulación es transitoria. Es decir, se introduce un caudal de entrada del río, existiendo un desfase de tiempo hasta que el caudal aparece en la salida de nuestra simulación.

Otro tipo de simulación sería la estacionaria, seguidamente se muestra como se debe actuar en el caso que nuestra simulación fuese de tal forma. Donde nuestra elección de resultados dependería del desfase temporal existente entre la entrada y salida de nuestro sitio en estudio.

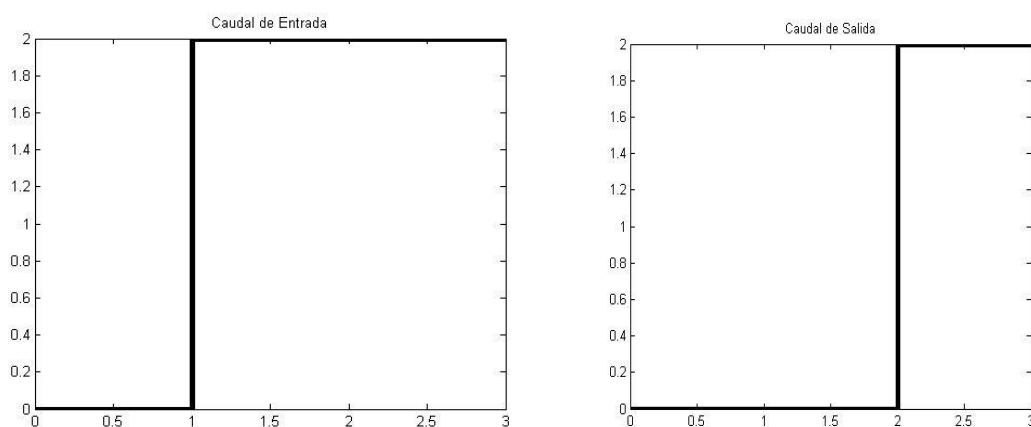


Figura 5.2. Caudal frente a tiempo.

En la figura 5.1 se puede observar el desfase de tiempo que hemos mencionado anteriormente, en el caso de una simulación estacionaria buscamos un instante de tiempo simulado donde tengamos el mismo flujo tanto a la entrada como a la salida. Por ejemplo, como se ilustra en la Figura 5.1 debemos buscar un tiempo 2 s para tener el mismo caudal y poder realizar un análisis estacionario.

Una vez mencionado el caso estacionario, nos centramos en nuestro estudio. Se trata de un proceso real y transitorio, es decir, difícilmente vamos a tener el mismo caudal de entrada que de salida, puesto que éste va aumentando según avanza el tiempo. Por este motivo nuestra selección de datos no se rige por ninguna condición.

Empezaremos mostrando las variables que por defecto obtenemos primeramente y con las cuales podemos explicar los efectos sobre la presa de Marmolejo. Se ilustrarán tres instantes de tiempo y acometeremos su comparativa. Los resultados son los siguientes:

Primeramente realizaremos una comparativa de la variable h , la cual nos muestra la profundidad del agua en el cauce estudiado. Se mostrará esta variable para un caudal bajo, esto se realizará de la misma forma para el resto de los valores, figurando seguidamente los resultados obtenidos conforme aumentamos el caudal, es decir, al mostrar la profundidad podremos observar el aumento de la variable h conforme se aumenta el caudal.

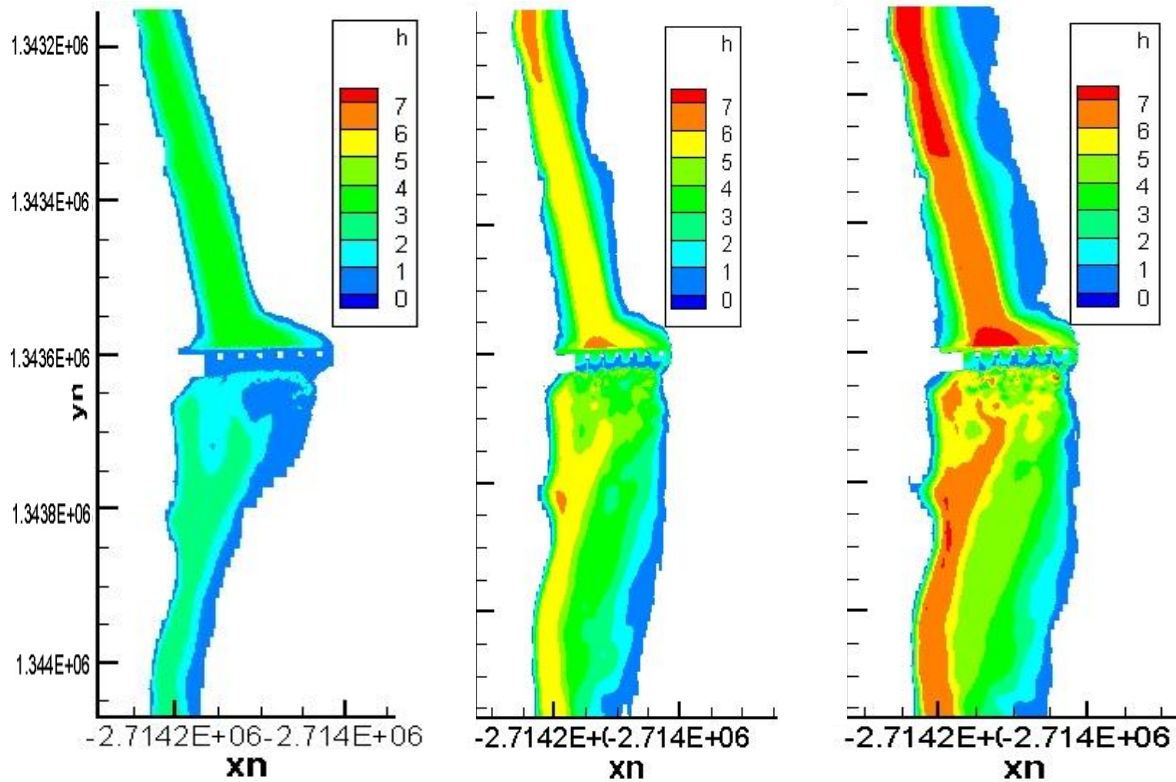


Figura 5.2. Variable profundidad para caudal bajo ($5000 \text{ m}^3/\text{s}$), medio ($46000 \text{ m}^3/\text{s}$) y alto ($91000 \text{ m}^3/\text{s}$) de izquierda a derecha respectivamente.

En la Figura 5.2, se han suprimido las zonas tanto aguas arriba como abajo que no están mojadas, es decir, las zonas secas del área simulada mediante la opción. Una vez que esta zona queda en blanco, también se oculta la grava y piedras que se pueden encontrar a lo largo del cauce. Aunque en un principio se puede pensar que esto afecta a la simulación ya que inicialmente tenemos un caudal bajo, no es así, debido a que alcanzaremos una profundidad elevada en poco tiempo de simulación. Con los resultados obtenidos se verá claramente la precisión que tiene la simulación bidimensional, ya que es capaz de captar una cantidad considerable de detalles.

Como se observa esta variable nos permite verificar nuestra simulación, puesto que cuando aumenta el caudal aumenta h . Aunque esta variable tiene su importancia para comprobar la validez de nuestra simulación no es de las más significativas físicamente. Nos interesarán las características que comentamos a continuación, donde se elude una serie de hechos sucedidos en el cauce debido a la presa de estudio.

Seguidamente se analizará la variable Z_s para cada caudal, la cual muestra la superficie de la lámina de agua, con la cual podemos observar muchos detalles y apoyados con las líneas de corriente y el número de Froude para canales abiertos podemos dar un racionamiento acertado de lo que sucede en el cauce del río Guadalquivir a su paso por la presa de Marmolejo.

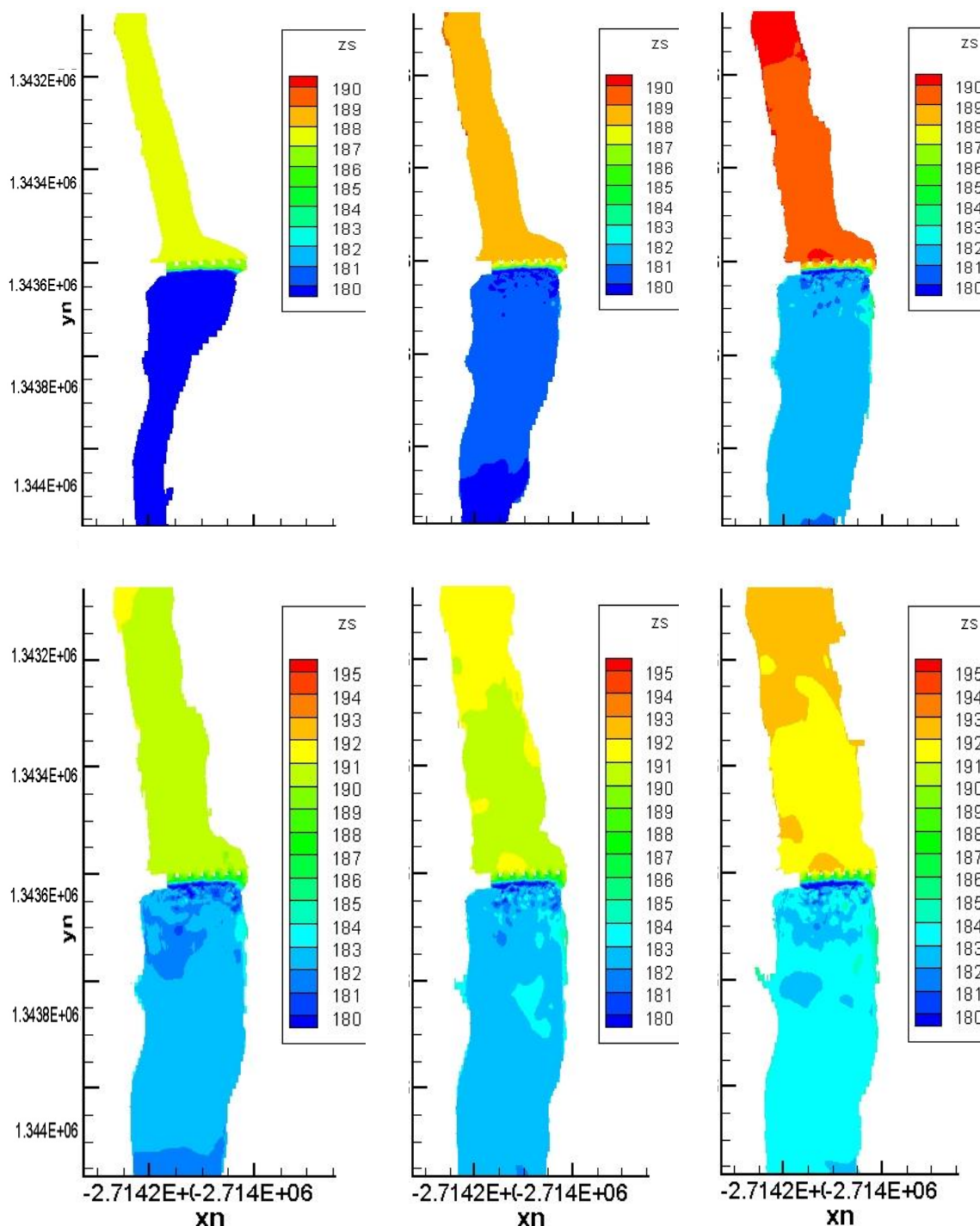


Figura 5.3. Variable elevación de la superficie de agua para caudal bajo ($5000 \text{ m}^3/\text{s}$), medio ($46000 \text{ m}^3/\text{s}$) y alto ($91000 \text{ m}^3/\text{s}$) de izquierda a derecha por cada fila respectivamente.

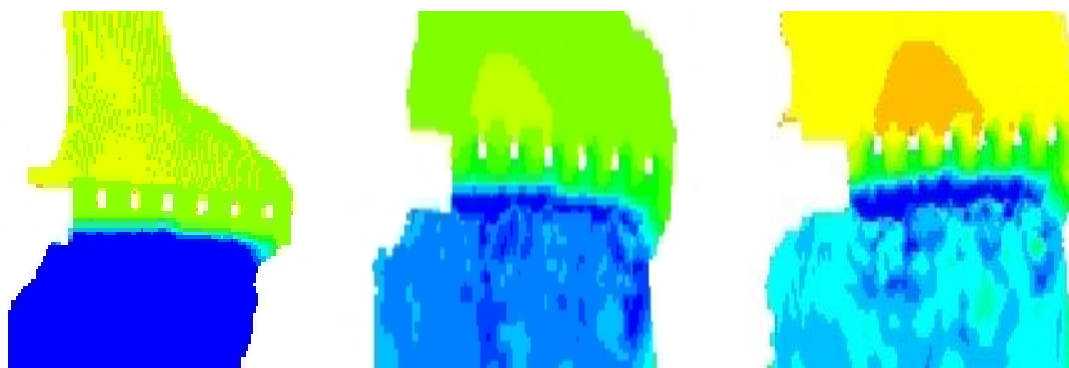


Figura 5.4. Detalles de la variable superficie de agua para un caudal bajo, medio y alto de izquierda a derecha respectivamente.

En la Figura 5.4 se muestran los detalles del flujo en la presa de estudio y comparándolos con las figuras completas se puede observar como en las compuertas de nuestra presa se produce un aumento de la variable Z_s que se iguala al de entrada. Como sabemos la superficie del agua es paralela al fondo de nuestro cauce, por lo que esta subida de nivel se debe al aumento del fondo y a que el agua impacta sobre los muros de las compuertas.

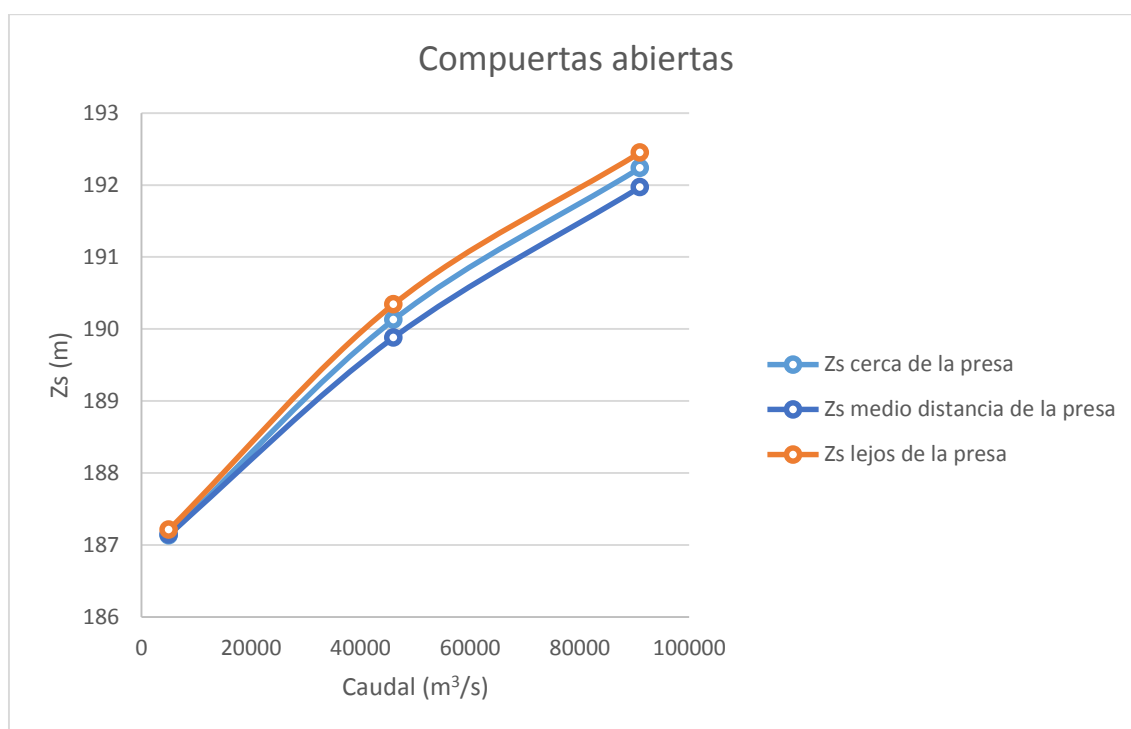


Figura 5.5 Comparación de variable Z_s en distintos puntos del cauce aguas arriba de la presa para distintos caudales.

El valor de Z_s debería incrementarse más lejos de la presa e ir disminuyendo conforme nos acercamos a ésta. Pero esto no es así, como se observa el valor de Z_s aumenta en la presa en mayor medida que en mitad del cauce. Esto se debe a que el flujo es subcrítico y a la presencia de la infraestructura hidráulica que provoca un efecto denominado “*backwater*” en la literatura anglosajona. Esto se entenderá mejor a continuación, mediante el análisis del número de Froude.

El número de Froude, aplicado a canales abiertos, es un número adimensional relacionado con la modelación y análisis dimensional. Este número nos facilita la información sobre el estado del flujo hidráulico, relacionando la velocidad del flujo con la velocidad de propagación de las pequeñas perturbaciones, de manera análoga al número de Mach en flujos compresibles. El número de Froude para canales abiertos se define como la relación entre el módulo de velocidad y la raíz de la profundidad y aceleración de la gravedad.

Para obtener el número de Froude, se deriva la ecuación de energía específica en función de la profundidad e igualando a cero. Esta fórmula puede ser reescrita a partir de la aplicación de la ecuación de continuidad. A partir de esta expresión y sabiendo que el número de Froude describe el punto de mínima energía del flujo libre obtenemos su expresión.

$$Fr = \frac{v}{\sqrt{g h}}$$

Siendo: v el módulo de la velocidad, g aceleración de la gravedad y h profundidad hidráulica.

Como hemos mencionado el número de Froude nos permite clasificar el flujo de un canal, los tipos de flujos son tres: flujo crítico, flujo supercrítico y flujo subcrítico. Esta clasificación se realiza en función de Fr . A continuación mostramos su clasificación y las características de cada flujo:

- $Fr > 1$ el régimen del flujo será supercrítico. Éste presenta altas velocidades para cauces con una pendiente alta, y profundidades más pequeñas.

- $Fr = 1$ el régimen del flujo será crítico. Éste presenta una transición de régimen subcrítico a supercrítico y viceversa. Esta condición es conocida como la condición crítica de escorrentía correspondiente al límite entre los regímenes fluvial y torrencial.
- $Fr < 1$ el régimen del flujo será subcrítico. Éste presenta velocidades bajas para cauces con pendientes bajas, y a profundidades mayores. [11]

Una vez descrito el número de Froude pasaremos a mostrarlo en la simulación realizada donde podemos ver su valor y explicar por qué sucede el aumento de Z_s en la presa antes de que el caudal sea homogéneo en todo el cauce.

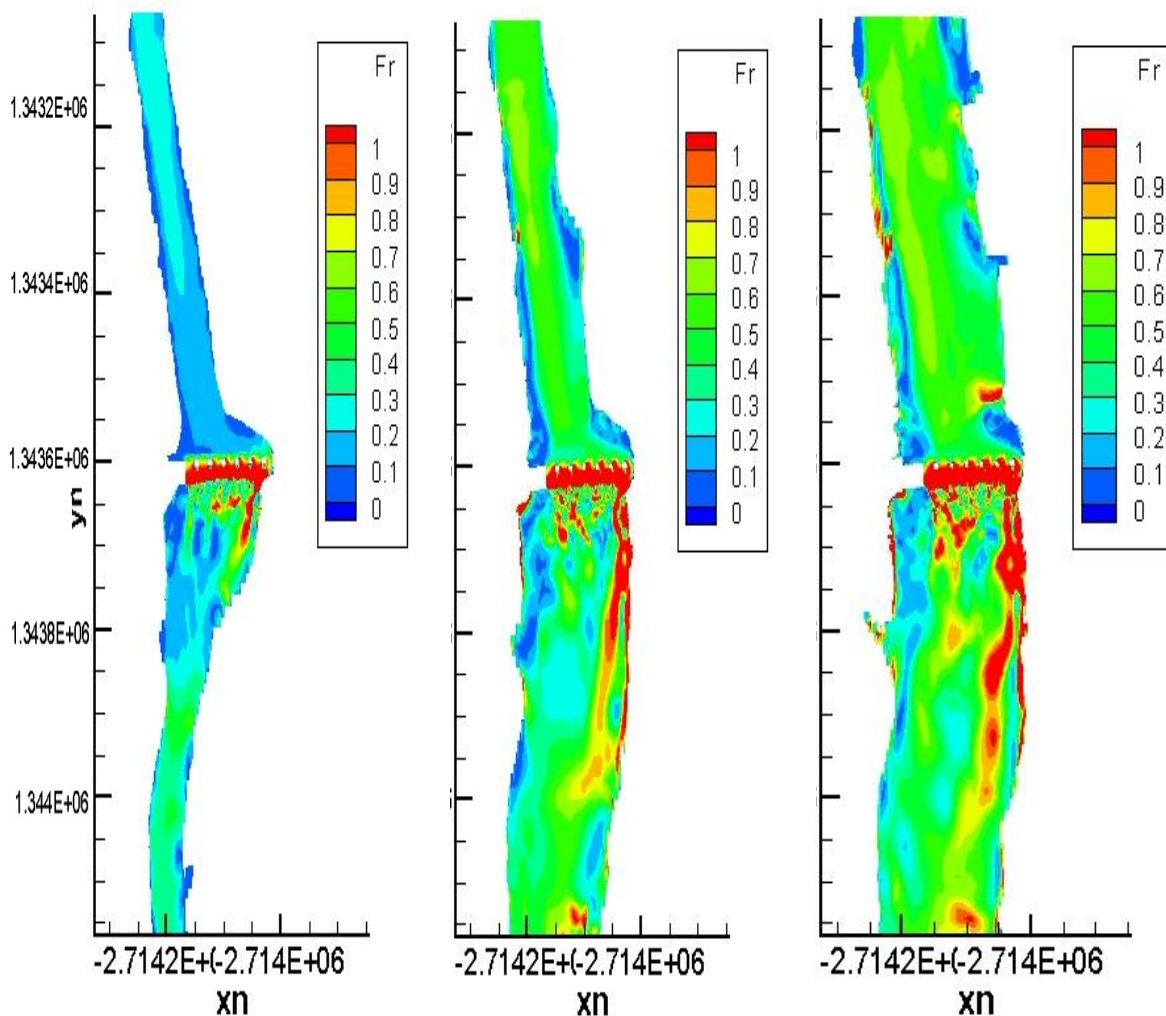


Figura 5.6. Número de Froude para caudal bajo ($5000 \text{ m}^3/\text{s}$), medio ($46000 \text{ m}^3/\text{s}$) y alto ($91000 \text{ m}^3/\text{s}$) de izquierda y derecha respectivamente.

En la Figura 5.6, para un caudal bajo, se puede corroborar que $Fr = 1$ en un resalte hidráulico, por lo que el régimen es crítico en la zona alta del mismo, justo antes de caer el agua.

Para un caudal bajo, exceptuando la zona de la presa donde el régimen del flujo cambia, el número de Froude esta por debajo de la unidad, es decir, el régimen predominante es el subcrítico. Esto quiere decir que la velocidad es pequeña.

Como se ilustra en la Figura 5.6 mostrada anteriormente, para caudales ya medios y altos el número de Froude aguas arribas aparece casi inalterado alcanzando un valor máximo de 0.7, es decir, estamos en régimen subcrítico. Cuando nos encontramos con un flujo en régimen subcrítico la infraestructura hidráulica causa un efecto que se propaga aguas arriba de la presa, sobre eleva el nivel del agua en la zona de la presa propagándose hacia Andújar, hecho que los vecinos de Marmolejo y Andújar proclaman desde que se construyó la presa.

Concluyendo, la elevación de la lámina de agua o el aumento de nuestra variable Z_s se debe al efecto que produce la presa sobre el flujo, ya que este se encuentra en régimen subcrítico propagando el efecto hacia aguas arriba.

A continuación, mostraremos los últimos resultados que se pueden obtener tras la simulación y que son de interés para el estudio. Se muestra primeramente los isocontornos de la velocidad para sus componentes x e y renombradas con u y v respectivamente, al mismo tiempo que se representa las líneas de corriente.

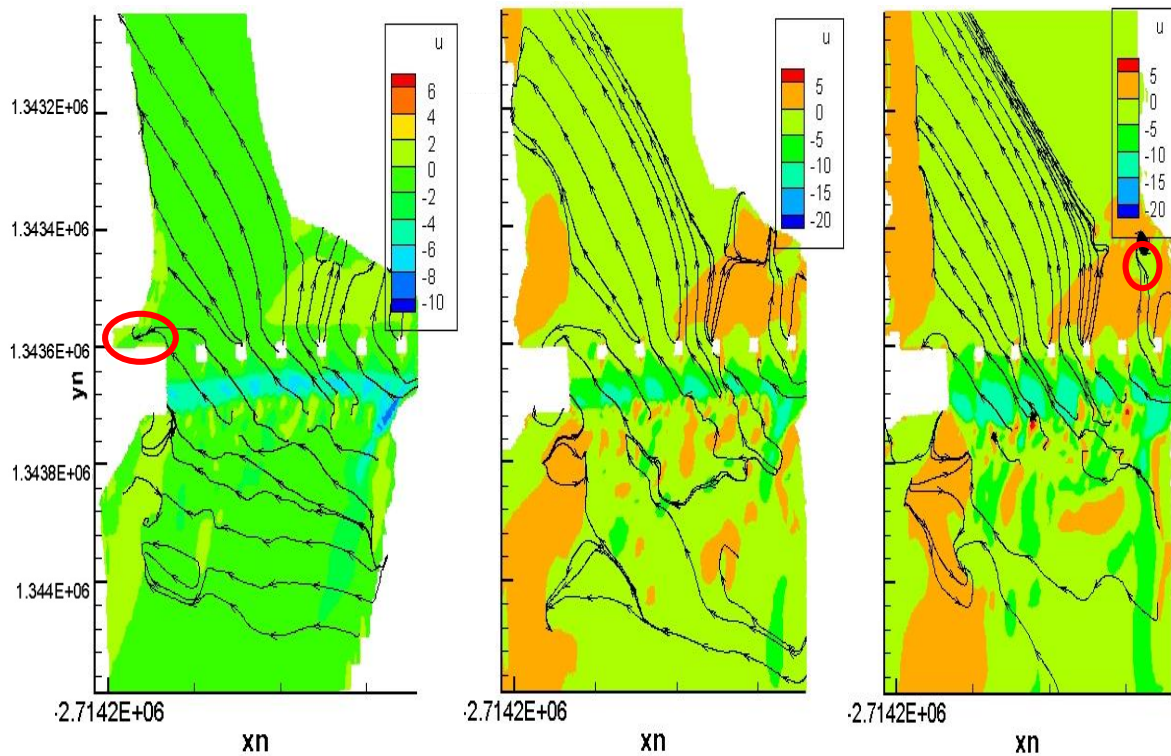


Figura 5.7. Isocontornos de velocidad en dirección x y líneas de contorno para caudal bajo ($5000 \text{ m}^3/\text{s}$), medio ($46000 \text{ m}^3/\text{s}$) y alto ($91000 \text{ m}^3/\text{s}$) de izquierda a derecha respectivamente.

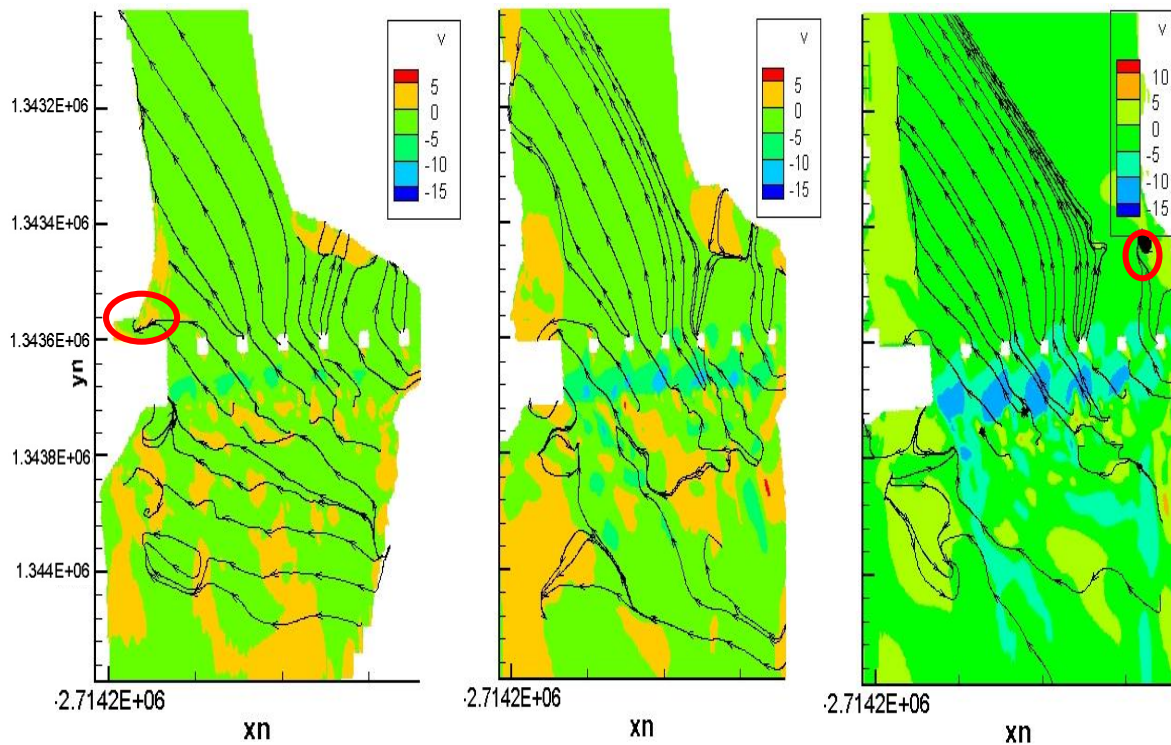


Figura 5.8. Isocontornos de velocidad en dirección y y líneas de contorno para caudal bajo ($5000 \text{ m}^3/\text{s}$), medio ($46000 \text{ m}^3/\text{s}$) y alto ($91000 \text{ m}^3/\text{s}$) de izquierda a derecha respectivamente.

La Figura 5.8 muestra los isocontornos y líneas de corriente para un caudal bajo, muestran lo mismo pero para caudales medios y altos respectivamente. De estos resultados podemos observar la dirección del flujo. Conforme se aumenta el caudal aparecen las turbulencias existentes una vez rebasada la presa donde se producen remolinos y reflujos, aunque lo más llamativo que se puede observar con estos resultados es la recirculación del flujo antes de llegar a la presa.

Esta recirculación se puede observar en las tres figuras anteriores señaladas con un círculo rojo. Esta recirculación provoca que los sedimentos en suspensión no sigan el cauce natural del río, esto quiere decir que se quedarán estancados antes de sobrepasar la presa, lo que puede provocar variaciones del flujo y daños estructurales en la presa por su acumulación.

Este proyecto puede ser continuado como se ha dicho en capítulos anteriores para realizar un estudio de sedimentación en el río Guadalquivir a su paso por la presa de Marmolejo. En este proyecto se realizará una vez expuestos los resultados un estudio básico de sedimentación en el cual se utilizará en número de Shields. Por último, para acabar de mostrar los resultados obtenidos sobre la simulación donde todas las compuertas están abiertas, expondremos el módulo de la velocidad, necesario para la obtención del número de Froude.

La siguiente figura ilustra el módulo de la velocidad para un caudal bajo, incrementándose mostrando un caudal medio y para finalizar un caudal alto. El módulo de la velocidad se muestra como variable necesaria para poder realizar otros análisis donde necesitamos conocer el mismo.

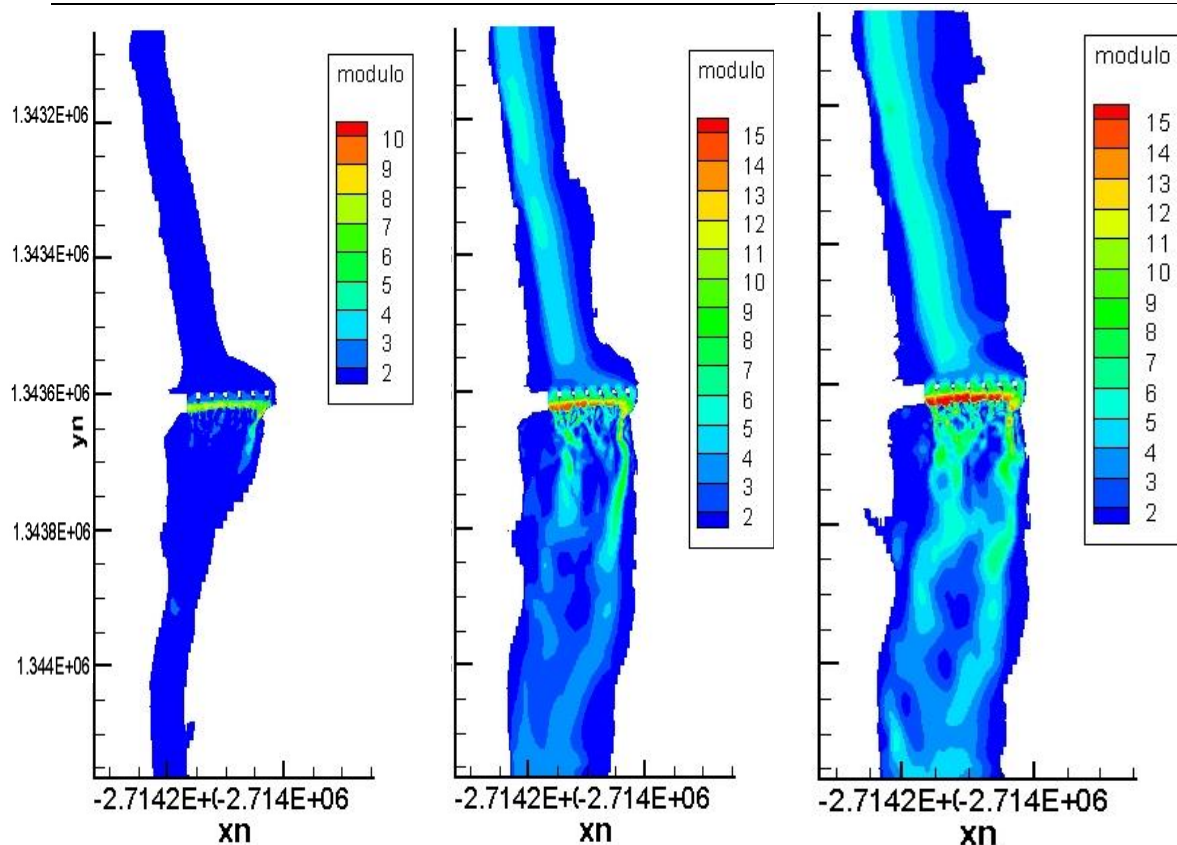


Figura 5.9. Módulo de velocidad para caudal bajo ($5000 \text{ m}^3/\text{s}$), medio ($46000 \text{ m}^3/\text{s}$) y alto ($91000 \text{ m}^3/\text{s}$) de izquierda a derecha respectivamente.

5.2 Compuertas cerradas

Tras la exposición de lo obtenido para el caso de que todas las compuertas de la presa se encuentren levantadas, vamos a explicar los resultados obtenidos para el caso de tener tres compuertas cerradas sin permitir el flujo por las mismas.

El procedimiento que se va a seguir para este caso será el mismo que el llevado en el anterior caso, con esto acabaremos la parte de resultados acerca del flujo y efecto que realiza la presa sobre este. Aunque el capítulo no estará acabado, puesto que finalizará con un apartado del estudio de las partículas contenidas en el flujo como hemos mencionado anteriormente y se volverá a mencionar aquí.

Como hemos mencionado con anterioridad, empezaremos mostrando las variables que por defecto obtenemos primeramente según los caudales fijados. Se ilustrarán tres instantes de tiempo y acometeremos su comparativa. Los resultados son los siguientes:

Primeramente realizaremos una comparativa de la variable h , la cual nos muestra la profundidad del agua en el cauce estudiado. Desarrollamos esta variable para un caudal bajo, esto se realizará de la misma forma para el resto de los valores, mostrando seguidamente los resultados obtenidos conforme aumentamos el caudal. Es decir, debemos ver los mismos aspectos explicados anteriormente.

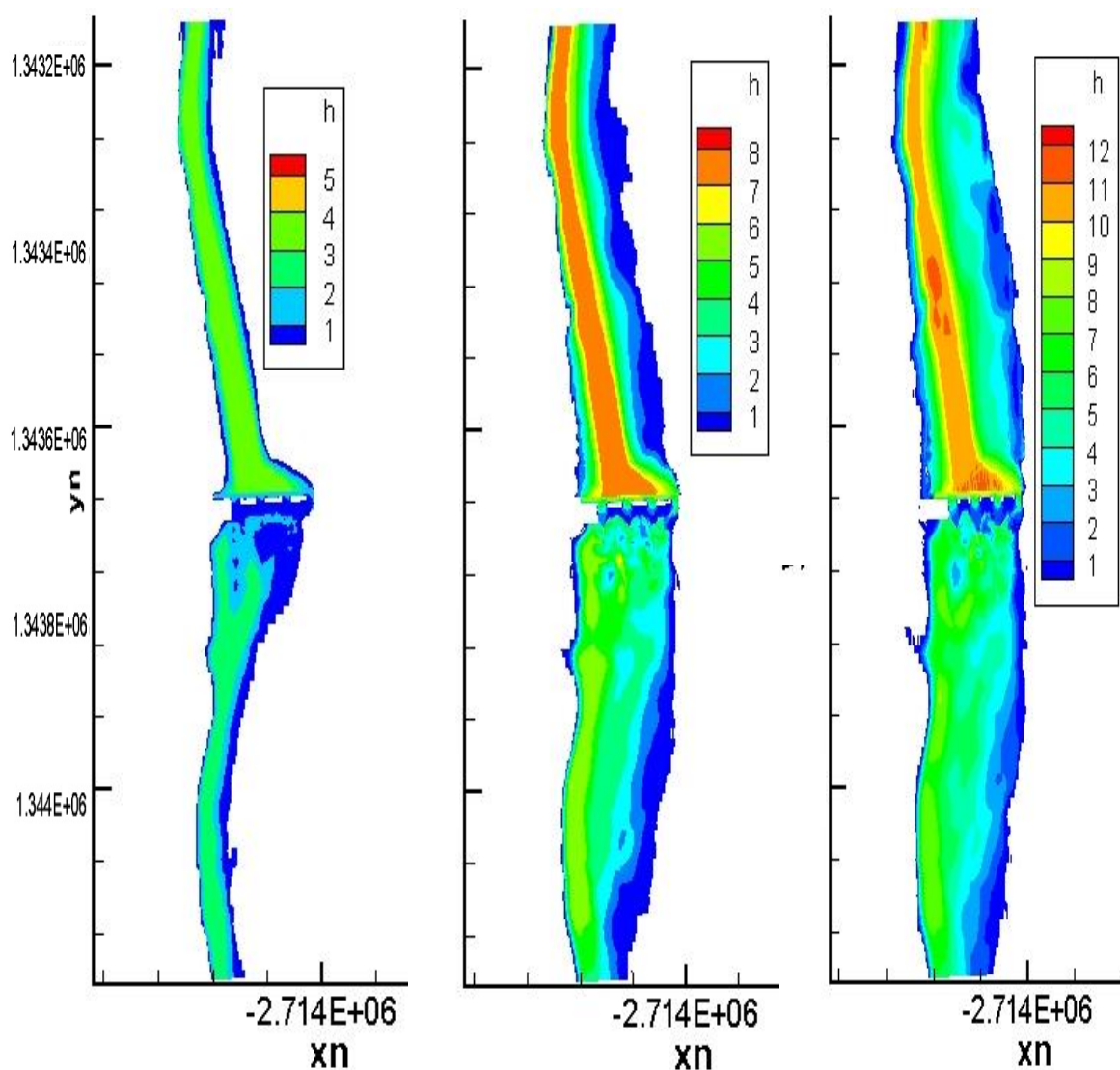


Figura 5.10. Variable profundidad para caudal bajo ($5000 \text{ m}^3/\text{s}$), medio ($46000 \text{ m}^3/\text{s}$) y alto ($91000 \text{ m}^3/\text{s}$) de izquierda a derecha respectivamente.

Se puede observar que cuando el río lleva una cierta velocidad y toma una curva, como observamos en la Figura 5.10, el agua se desplaza hacia uno de los lados, dependiendo de la orientación de la curva, debido a la fuerza centrífuga. Esto se puede contemplar en las figuras anteriores y en la figura donde se muestra h . Ya que el río no tiene la misma altura, sino que esta varía, esto se debe a la existencia del meandro. Por lo que podemos decir que donde menos cota hay mayor deposición de sedimento habrá.

Seguidamente se analizará la variable Z_s para cada caudal, ésta muestra la superficie del agua, con la que podemos observar apoyados con las líneas de corriente y el número de Froude muchos detalles para canales abiertos y así dar un racionamiento acertado. Solo se mostrará los resultados de Z_s y el número de Froude, puesto que la explicación está en los resultados anteriores.

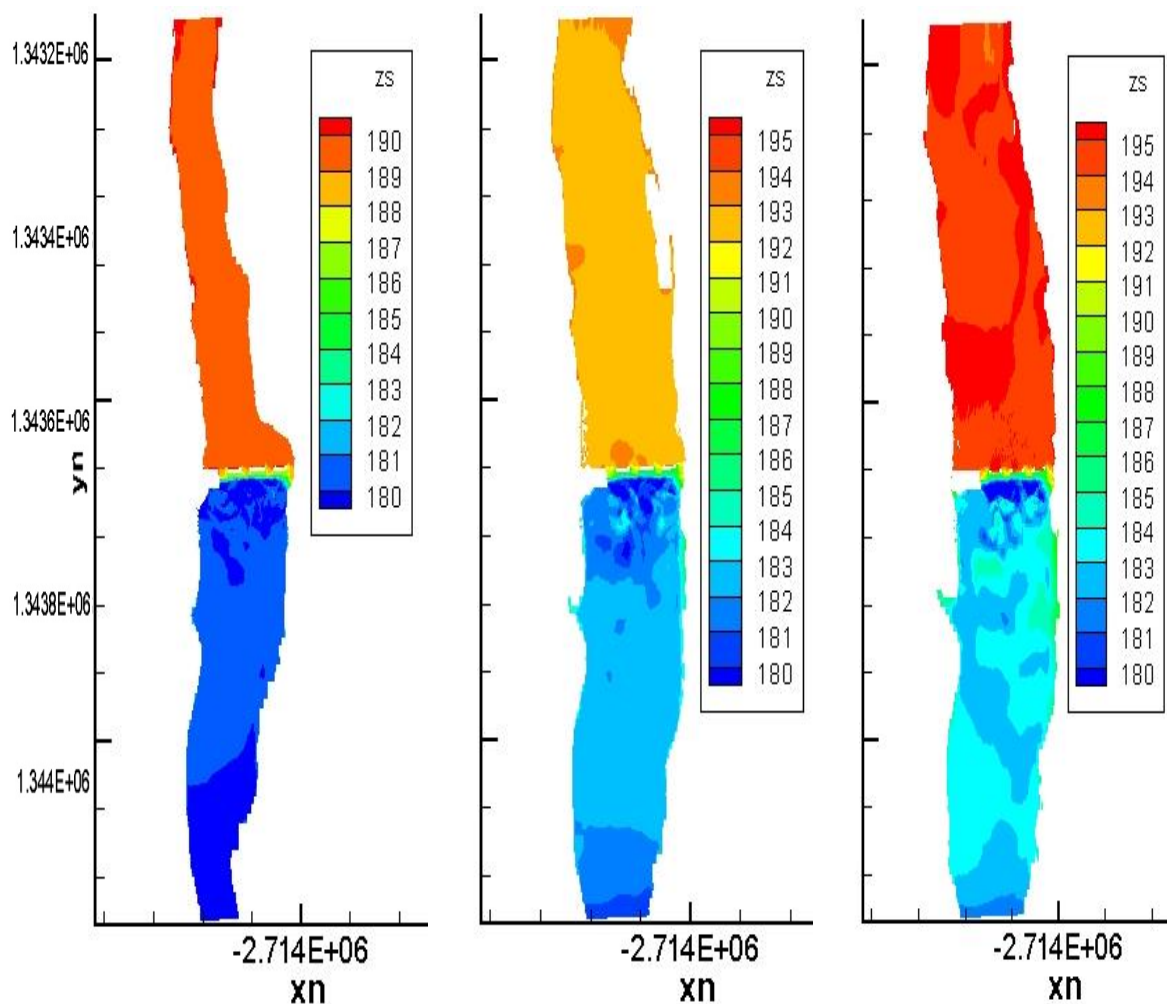


Figura 5.11. Variable elevación de la superficie de agua para caudal bajo ($5000 \text{ m}^3/\text{s}$), medio ($46000 \text{ m}^3/\text{s}$) y alto ($91000 \text{ m}^3/\text{s}$) de izquierda a derecha respectivamente.

Como podemos observar nos encontramos ante la misma situación que para las compuertas abiertas en un principio, puesto que contemplamos como la presa con tres compuertas cerradas produce una variabilidad en Z_s similar al caso anterior, es decir, se produce un aumento de la superficie de la lámina de agua. Aunque en un principio se pueda pensar que ocurre lo mismo aquí que en el caso de compuertas abiertas, se comprobará seguidamente que no es así. Aunque la variación es pequeña.

El aumento de la superficie del agua será en mayor medida, puesto que como se menciona anteriormente el aumento del nivel del agua se debe a la infraestructura hidráulica que está situada como obstáculo al cauce del río. En este caso encontramos solamente tres compuertas obturadas lo que produce que el aumento de la superficie del agua sea mayoritario.

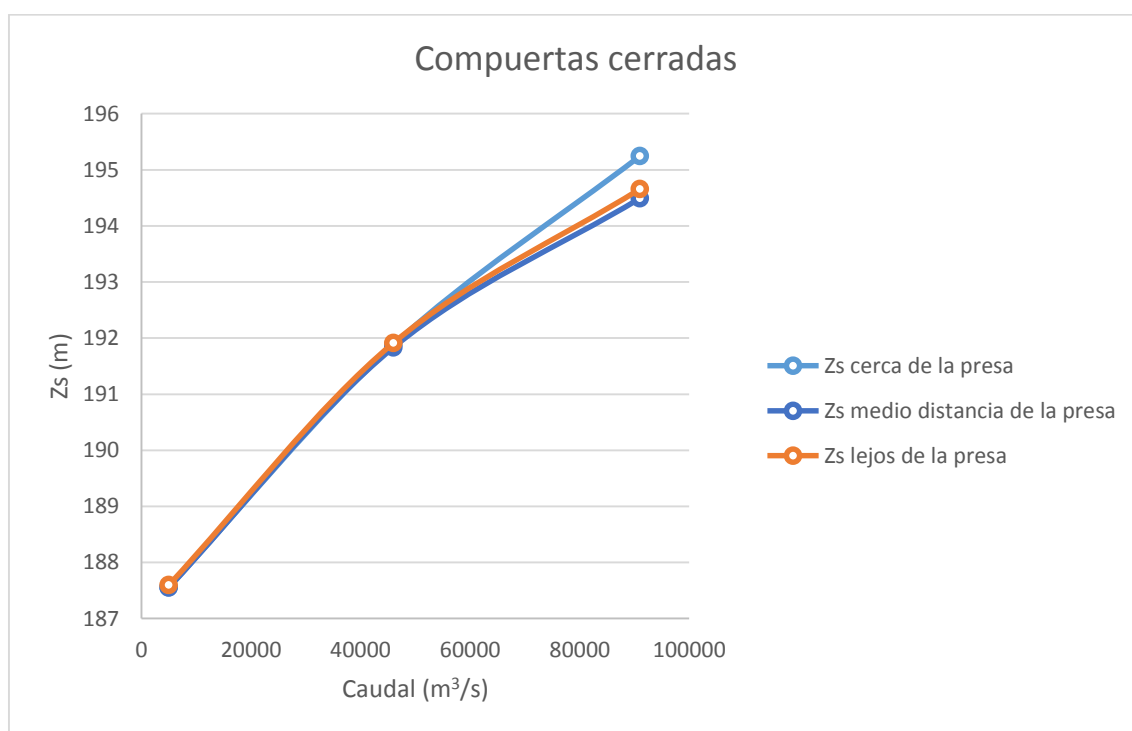


Figura 5.12. Comparación de variable Z_s en distintos puntos del cauce aguas arriba de la presa para distintos caudales.

Como se observa en la figura anterior los valores de Z_s a la llegada de la presa y media distancia de ésta son más igualados que en el caso de compuertas abiertas. Con esta gráfica y con las siguientes donde mostramos el número de Froude podemos llegar a la conclusión de que a pesar de las compuertas cerradas el número de Froude es máximo. Este valor provoca que el aumento

de profundidad se propague de ídem forma al caso anterior y el caudal en la entrada de nuestra simulación provoque una elevación de la variable Z_s y se difunda hacia la presa.

En la Figura 5.12 contemplamos que el valor de Z_s varía en menor medida que para compuertas abiertas. Que la diferencia sea menor se debe a que las compuertas cerradas permite la elevación de la superficie del agua cerca de la presa sea igual al punto más alejado de la infraestructura. Puesto que pese aumentar el caudal primeramente en la zona más lejana la transmisión de la superficie se hace a mayor velocidad. Cuando el caudal es grande la variable Z_s se hace mayor cerca de la presa, lo que significa que el desbordamiento es posible.

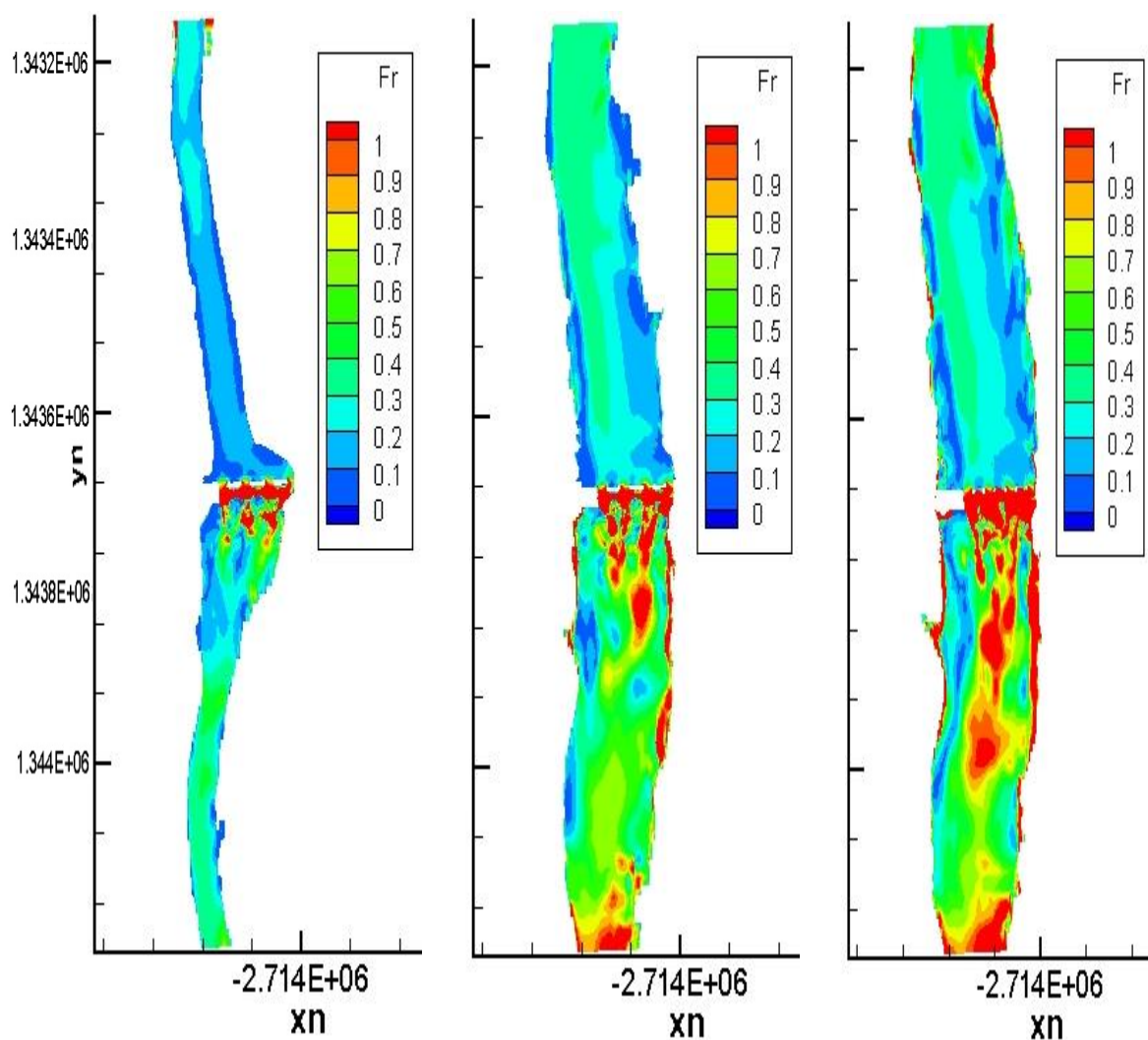


Figura 5.13. Número de Froude para caudal bajo ($5000 \text{ m}^3/\text{s}$), medio ($46000 \text{ m}^3/\text{s}$) y alto ($91000 \text{ m}^3/\text{s}$) de izquierda a derecha respectivamente.

En la Figura 5.13 mostrada anteriormente, para caudales ya medios y altos el número de Froude aguas arriba aparece casi inalterado. Como podemos observar si comparamos estas gráficas con las anteriores de los resultados sin compuertas podemos concluir que los valores de Fr son menos en este caso, alcanzando valores entre 0.3 y 0.7 mayoritariamente. Es decir, estamos en régimen subcrítico como en el caso anterior.

Por lo que el efecto que produce la instalación hidráulica como en nuestro caso anterior, es la propagación aguas arriba de la presa del efecto producido, sobre elevando el nivel del agua en la zona de la presa. La propagación será más rápida que en el caso anterior puesto que el número de Froude es menor y tenemos cerradas varias compuertas.

A continuación, mostraremos los últimos resultados que se pueden obtener tras la simulación y que son de interés para el estudio. Se observan primeramente los isocontornos de la velocidad para sus componentes x e y renombradas con u y v respectivamente, al mismo tiempo que se representan las líneas de corriente, es decir el movimiento del flujo.

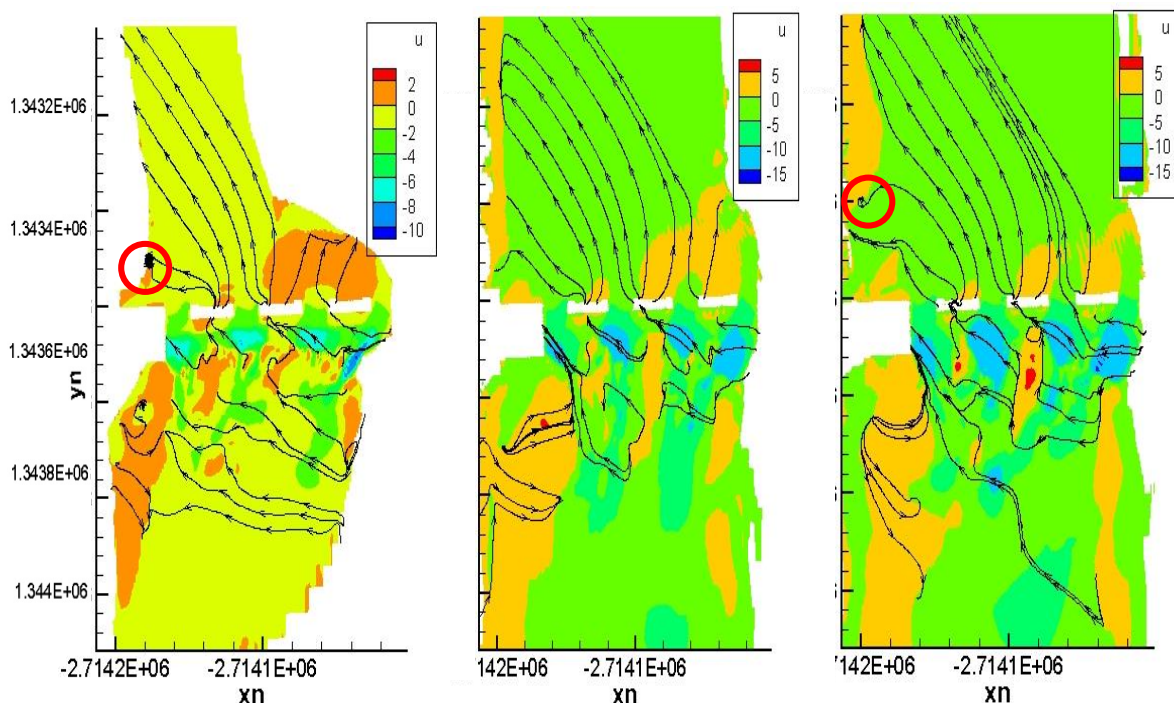


Figura 5.14. Isocontornos de velocidad en dirección x y líneas de contorno para caudal bajo ($5000 \text{ m}^3/\text{s}$), medio ($46000 \text{ m}^3/\text{s}$) y alto ($91000 \text{ m}^3/\text{s}$) de izquierda a derecha respectivamente.

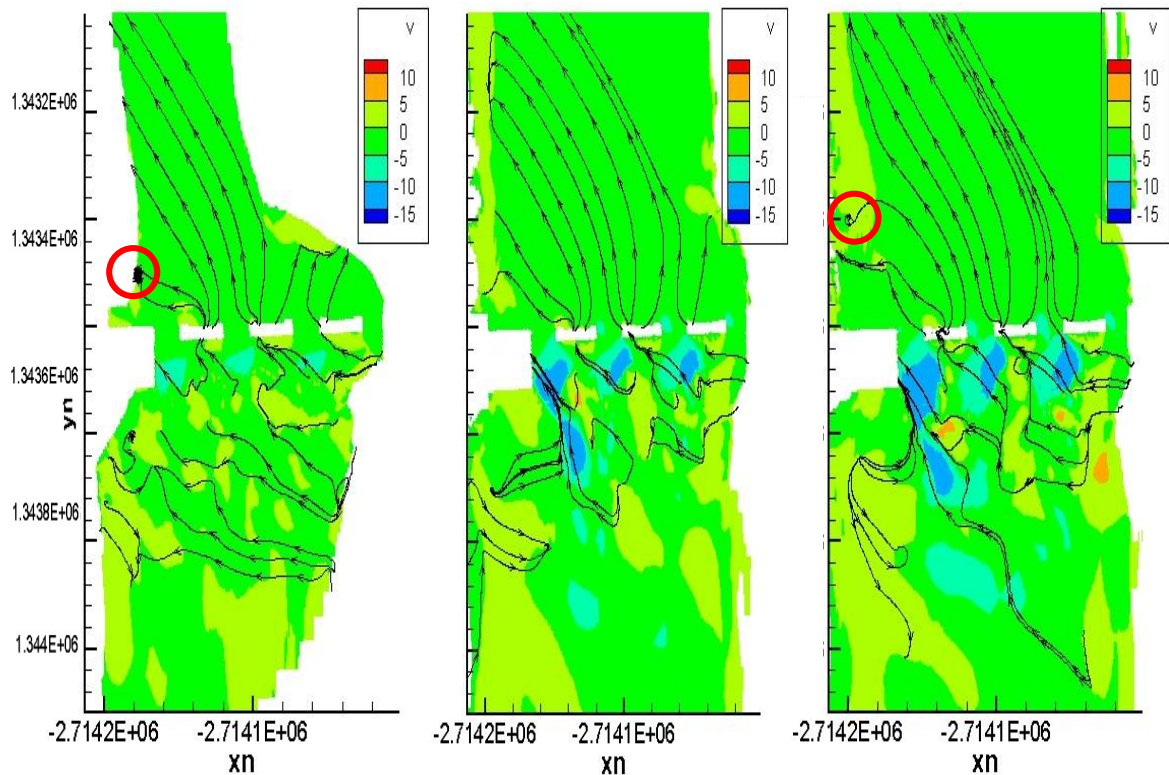


Figura 5.15. Isocontornos de velocidad en la dirección y y líneas de contorno para caudal bajo ($5000 \text{ m}^3/\text{s}$), medio ($46000 \text{ m}^3/\text{s}$) y alto ($91000 \text{ m}^3/\text{s}$) de izquierda a derecha respectivamente.

La Figura 5.14 muestra los isocontornos de velocidad en la dirección x y líneas de corriente para un caudal bajo, medio y alto; mientras que la Figura 5.15 ilustra lo mismo pero en dirección y para caudales bajos, medios y altos respectivamente. De estos resultados podemos observar la dirección del flujo. Conforme se aumenta el caudal existen turbulencias una vez rebasada la presa donde se produce remolinos y reflujos. Aunque si comparamos con los isocontornos y líneas de corriente mostradas en el caso anterior podemos observar que aguas arriba de la presa no se produce recirculación del flujo tan significativamente.

Esta recirculación produce el mismo efecto descrito anteriormente, es decir, se muestran torbellinos que pueden producir daños en la infraestructura hidráulica. Por último, mostraremos el módulo de la velocidad necesario para la interpretación de los resultados que han sido descritos anteriormente y que se detallarán posteriormente a estos.

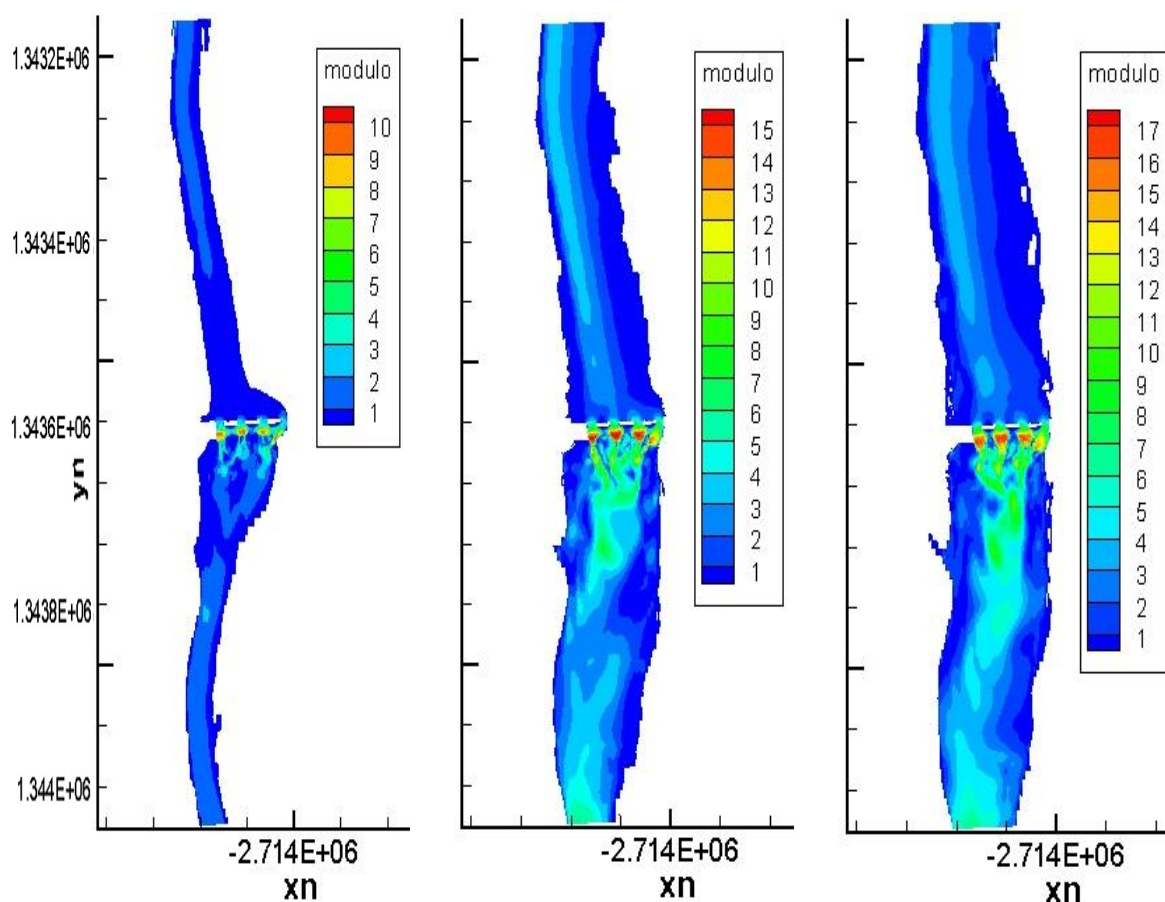


Figura 5.16. Módulo velocidad para caudal bajo ($5000 \text{ m}^3/\text{s}$), medio ($46000 \text{ m}^3/\text{s}$) y alto ($91000 \text{ m}^3/\text{s}$) de izquierda a derecha respectivamente.

La Figura 5.16 muestra el módulo de velocidad según aumenta el caudal. El módulo se muestra como en el caso anterior porque es una variable necesaria para poder interpretar otras variables aunque el módulo de la velocidad no tenga interés físico.

5.3 Estudio del movimiento de sedimento

Como hemos mencionado a lo largo de este capítulo, se realizará un estudio sobre el movimiento del sedimento para entender mejor el alcance de este proyecto. Como se dijo en capítulos anteriores este proyecto se realiza para predecir con detalle el comportamiento del flujo y sus efectos en la presa de Marmolejo con el cual se puede acometer un estudio de sedimento causante de muchos efectos negativos para la presa.

Primeramente se realizará una introducción sobre el método elegido para tener un estudio simplificado del movimiento de sedimento, el método elegido es el de Shields. Éste es el método más común para determinar los flujos de material sólido que son transportados conocidas las variables hidráulicas. En nuestro caso, los sedimentos que mayoritariamente encontramos en el cauce del Guadalquivir son limo y arena. Se hace el estudio para arena en el fondo y su flotación en el cauce del río Guadalquivir. El limo se obviará en el análisis puesto que su estudio de floculación está afectado por el comportamiento cohesivo del material lo que dificulta su observación, mientras que la arena no es cohesiva.

La teoría de Shields está basada en el análisis del esfuerzo cortante adimensional que ejerce la fase acuosa sobre el lecho del canal. Éste realiza una comparación entre el coeficiente de fricción y el número de Reynolds a la vez que se representan en el mismo las curvas que relación el tamaño de grano y la profundidad.

Para la elección de estos parámetros tenemos que acudir a las características del terreno por el que fluye el río Guadalquivir. Para entender por qué nos apoyamos en este diagrama, primeramente se explicara el número adimensional de Shields, el cual relaciona el coeficiente de fricción con el tamaño de grano. El número de Shields viene dado:

$$Sh = \frac{f v^2}{8 (s - 1) g d_{50}}$$

Donde:

- f es el coeficiente de fricción.
- v es el módulo de la velocidad de nuestro flujo.
- s es la relación entre las densidades del sólido y el agua.
- g la aceleración de la gravedad.
- d_{50} definimos el tamaño del grano.

En nuestro caso entraremos en el diagrama de Moody con la afirmación de que nuestra profundidad respecto al tamaño de grano es grande, es decir, el régimen hidráulico es suave, $d_{50}/h \rightarrow 0$ la relación tiende a cero. Esta condición nos permite escoger el coeficiente de fricción necesaria, este valor se obtiene

según observamos en el diagrama de Moody, observando los valores que más se acercan a nuestra situación.

Decidimos la relación entre tamaño de grano y profundidad según la zona del diagrama de Moody para valores entre 0.00005 y 0.00001 obteniendo un valor de fricción 0.008. La fricción será una constante utilizada en el número de Shields.

Tras la elección del valor de fricción hay que realizar las simplificaciones oportunas. La primera simplificación consiste la relación entre densidades del sólido y el agua, en nuestro caso se tomará tanto para arena como para limo una densidad del sólido 2650 kg/m^3 mientras que la densidad del agua es 1000 kg/m^3 , es decir, $s = 2.65$. Quedando el número de Shields completamente desarrollado:

$$Sh = \frac{f v^2}{8 (s - 1) g d_{50}}$$

Este número será el que evaluamos donde variaremos solamente el valor del tamaño de sólido, diferenciado entre sedimento fino y grueso:

- Arena fina con un tamaño de 1 mm
- Limo con un tamaño de 0.01 mm

Según el método elegido podemos distinguir dos valores límites para el movimiento del sedimento, estos valores caracterizan el inicio de movimiento de sedimento por arrastre en el fondo del cauce:

- Para arena el valor de Sh debe ser mayor de 0.03
- Para limo el valor de Sh debe superar el valor de 0.2

Y por último los otros valores límites definen cuando el sedimento pasa de moverse en el fondo hacia la resuspensión del sedimento, estos valores tienen asociada un porcentaje de posibilidad para la misma:

- Para arena el valor de Sh debe ser mayor de 0.05 con un 20% de probabilidad para la resuspensión del sedimento.

- Para arena el valor de Sh debe ser mayor de 0.6 con un 42% de probabilidad para la resuspensión del sedimento.

Una vez comprendido el método elegido pasaremos a mostrar los resultados obtenidos en nuestra simulación, con los cuales podemos interpretar el movimiento de los sedimentos en nuestra zona de estudio. A continuación, mostramos los resultados para compuertas abiertas y para compuertas cerradas.

5.3.1 Compuertas abiertas

Primeramente dentro de las compuertas abiertas se mostrará los resultados para arena según se aumenta el caudal y seguidamente para limo también según aumenta el caudal. La Figura 5.15 muestra los resultados para arena según aumenta el caudal, es decir, comenzamos con un caudal bajo hasta uno que alcanzamos valores de caudal elevado.

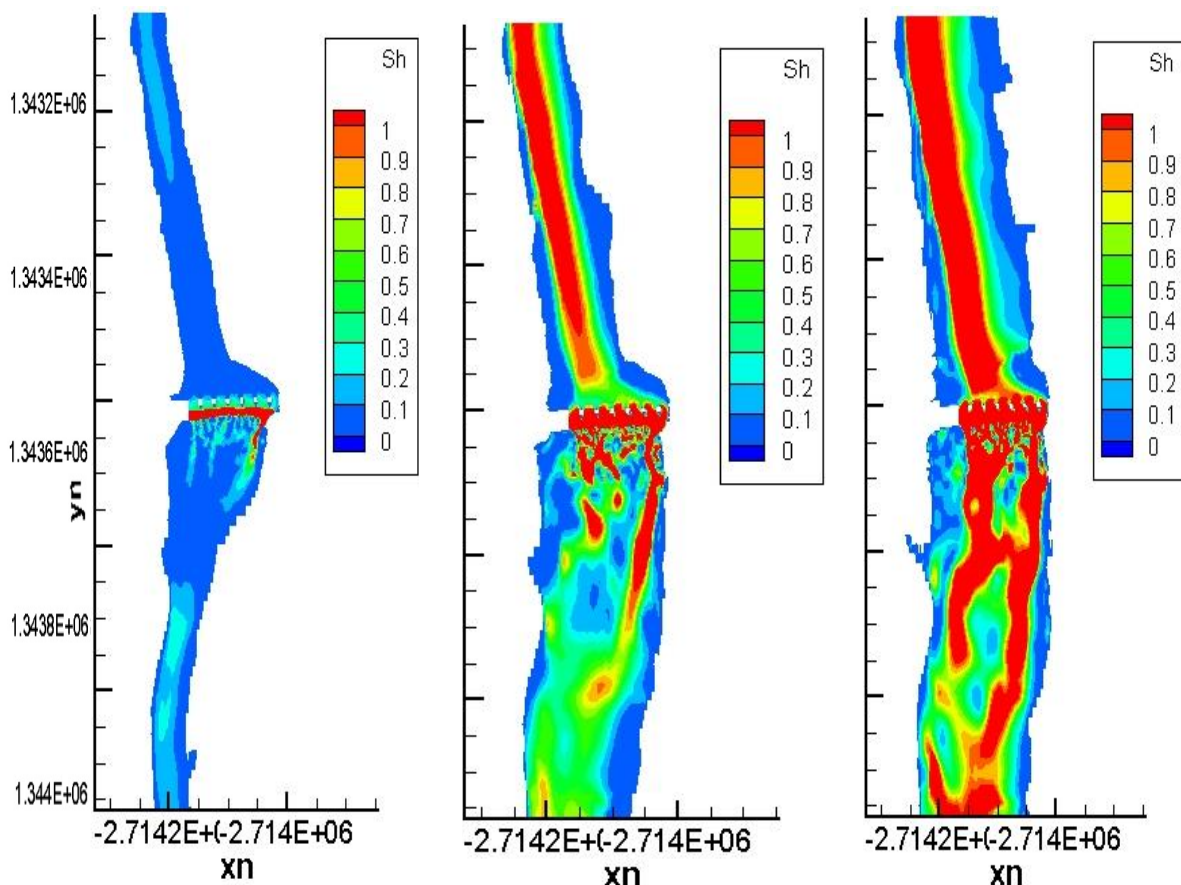


Figura 5.17 Número de Shields para un tamaño de grano de arena fina, se muestra caudal bajo ($5000 \text{ m}^3/\text{s}$), medio ($46000 \text{ m}^3/\text{s}$) y alto ($91000 \text{ m}^3/\text{s}$) de izquierda a derecha respectivamente.

Como podemos observar, en el resalto hidráulico que se produce en la presa de Marmolejo, el número de Shields alcanza un valor máximo, es decir, se transporta todo el sólido en suspensión. Para el caudal bajo no se produce movimiento de arena, únicamente se observa movimiento del sedimento del estilo arena aguas abajo de la presa, justamente pasado el resalto hidráulico donde el flujo es más turbulento.

En la Figura 5.17 para un caudal medio, observamos que aguas arriba de la presa el número de Shields es elevado, excepto en las orillas y sobre todo en la orilla interior donde hay una zona mayor con un valor de 0, es decir, tras pasar el meandro. Los valores máximos que se alcanza están entre 1 - 0.7 valores a partir de los cuales la arena resuspende con una posibilidad mayor del 42%. Aguas abajo, el número de Shields es irregular respecto a sus valores aunque se produce igualmente el movimiento mayoritario de la arena resuspendida aguas arriba.

Por último, para un caudal alto como se observa Figura 5.17 se produce una resuspensión y movimiento del sedimento total. En las orillas se desplaza por el fondo y no atraviesa la presa lo que provoca la acumulación de sedimentos y la reducción del cauce.

Seguidamente se comentará la Figura 5.18 la cual muestra los resultados de limo para un caudal bajo, en el cual observamos el número de Shields.

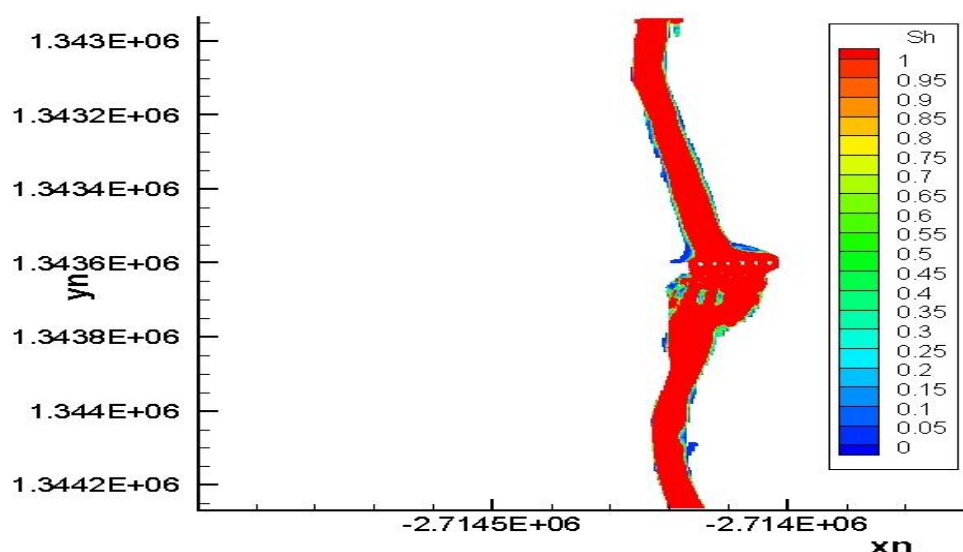


Figura 5.18. Número de Shields para limo en un caudal bajo ($5000 \text{ m}^3/\text{s}$).

En la Figura 5.18, el número de Shields es mayoritariamente crítico, alcanza el valor máximo, esto sucede de la misma forma conforme aumentamos el caudal, se puede decir que según este análisis se produce una resuspensión total del limo.

5.3.2 Compuertas cerradas

Primeramente dentro de las compuertas cerradas se mostrarán los resultados para arena según se aumenta el caudal. A continuación, para limo se hará una mención a los resultados obtenidos pero no se mostrará ninguna figura por brevedad La Figura 5.17 muestra los resultados para arena según aumenta el caudal, es decir, de un caudal bajo hasta uno alto.

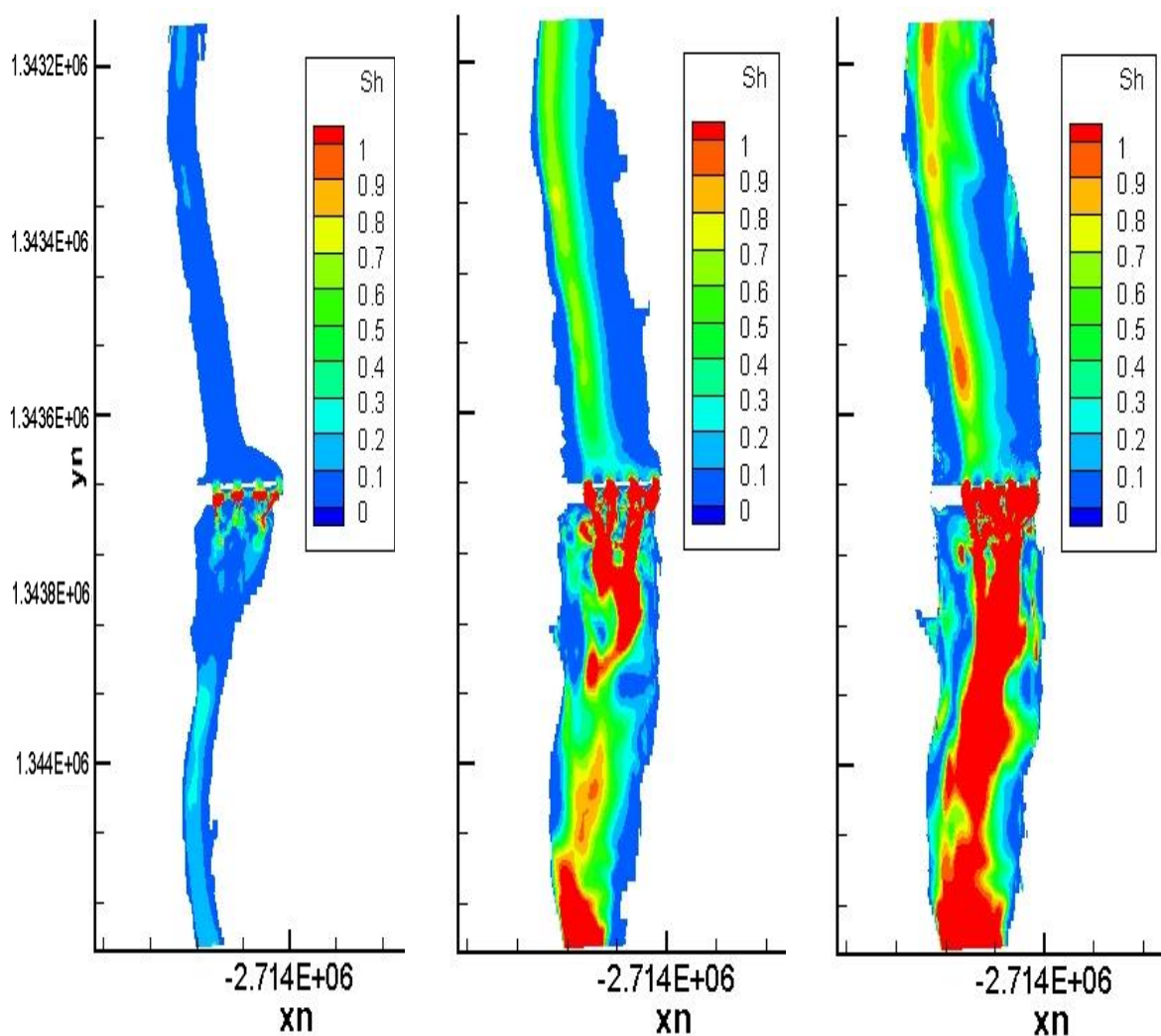


Figura 5.19. Número de Shields para tamaño de grano de arena fina para caudal bajo ($5000 \text{ m}^3/\text{s}$), medio ($46000 \text{ m}^3/\text{s}$) y alto ($91000 \text{ m}^3/\text{s}$) de izquierda a derecha respectivamente.

En la Figura 5.19 contemplamos el número de Shields para distintos caudales. Distinguimos como en las zonas de compuertas abiertas en el resalto se obtiene el valor máximo como en el caso anterior. Para el caudal bajo, como podemos ver, el número de Shields alcanza valores mínimos. Únicamente se produce movimiento del sedimento existente aguas abajo junto a la presa.

En la Figura 5.19 para un caudal medio se observa como aguas arriba ocurre lo mismo que en el caso de compuertas abiertas, es decir, se produce una resuspensión de los sedimentos. Cuando éstos se encuentran contra la presa como podemos ver, se produce la sedimentación en la zona cercana a las compuertas. Sin embargo, aguas abajo alcanzamos valores superiores a los mínimos para una resuspensión de la arena con una probabilidad mayor al 42%.

Para finalizar, cuando tenemos un caudal alto, éste consigue colmar la presa. Observamos que agua arriba de la presa los valores del número de Shields es menor que para compuertas abiertas. Se produce mayor sedimentación en las orillas y solamente se produce resuspensión en la parte central del cauce, sin embargo, aguas abajo sí se consigue como para caudal medio una resuspensión y movimiento del sedimento.

Para dar por finalizado este capítulo, una vez analizado los resultados obtenidos para arena, comentaremos el caso donde tenemos partículas de limo. Para éste no mostraremos resultados porque se consiguen unos resultados elevados en todo el cauce, el limo se moverá completamente según el método Shields. Debido a su complicado estudio, puesto que la estimación del tamaño de la partícula es complicada y éste suele ser muy pequeño, no se sacarán conclusiones sobre este. No obstante cabe destacar que a pesar de que el drenaje de estas partículas es muy pobre éstas se transportan en suspensión debido a su reducido peso.

6. Conclusiones

A lo largo de este proyecto se han desarrollado numerosos aspectos relativos al drenaje del río Guadalquivir a su paso por la presa de Marmolejo. En este capítulo se realiza una revisión de los aspectos más importantes mostrados en los capítulos anteriores, así como un resumen de los datos obtenidos más relevantes. Además, se expondrán los trabajos futuros complementarios del estudio realizado.

En este proyecto se ha presentado el cauce del río Guadalquivir a simular y se ha descrito el recorrido aguas arriba de la presa y aguas abajo de la misma, tanto para mostrar las distintas características del cauce, como meandros; como para mostrar la problemática existente de los sedimentos, esta problemática es una línea de trabajos futuros.

Seguidamente, se ha descrito el Modelo Digital de Elevaciones (MDE) que se ha utilizado para este proyecto, mostrando la precisión del mismo. Para el MDE hemos utilizado el software Global Mapper herramienta descrita anteriormente, que nos ayuda sobre la elección, en una ortofotos, del área de estudio y las dimensiones de la misma. Además, nos permite ver cortes longitudinales y transversales de zonas concretas del río.

Una vez se realiza el desarrollo sobre la zona de estudio, se presenta los métodos elegidos para el desarrollo bidimensional de nuestro estudio, primeramente se describe la ecuación de Saint-Venant para aguas someras, ya que se ha simulado el cauce con el software Dassflow para modelos bidimensionales.

Para el análisis bidimensional, existe la necesidad previa de realizar un pre-procesado a la simulación, donde se establecen las pautas del por qué y el cómo del proyecto. Aquí se realiza la malla utilizada para la simulación, así mismo, las condiciones que nos encontraremos en el contorno y en el inicio y fin de nuestra área de simulación.

Finalmente, se han ofrecido los distintos resultados para nuestro análisis. Se ha realizado dos simulaciones tanto para un drenaje con todas las

compuertas de la presa abiertas, como para drenaje con unas compuertas abiertas y otras cerradas. Así como un pequeño estudio del movimiento del sedimento para comprender su potencial en trabajos futuros.

Para el estudio bidimensional del flujo de agua, se realiza una simulación transitoria, puesto que en ningún momento tendremos el mismo caudal de entrada que de salida. Una vez que definimos que se trata una simulación meramente transitoria obtenemos las distintas variables que se estudian y que nos permiten conocer el comportamiento del flujo; como son la velocidad, profundidad y el tamaño de la lámina de agua superficial.

En la visión de las variables que se estudian se realiza mediante el software TecPlot, que nos permite una visualización de los resultados, ya que éste es uno de los formatos de salida de los archivos que nos proporciona el software Dassflow. Una vez realizado todos estos pasos podemos llegar a las conclusiones. A continuación se listan las distintas conclusiones, que a lo largo del proyecto, se han ido obteniendo, aunque muchas de estas ya han sido comentadas y descritas en capítulos posteriores.

La primera y más obvia conclusión que podemos comentar que con el aumento del caudal se produce un aumento de la variable profundidad y el aumento del área mojada. El aumento de esta profundidad se realiza en un pequeño intervalo de tiempo lo que sirve para la validación de nuestra simulación. La profundidad aumentará de mayor medida en la simulación donde tenemos compuertas cerradas.

La variable Z_s , la cual nos define la superficie de la lámina de agua, es la que consideramos de más importancia para nuestro estudio junto al número de Froude. Estas variables nos permiten conocer el efecto que tiene la presa sobre el cauce del río Guadalquivir. Se observa en la variable Z_s como aumenta justo en las zonas de la presa a la vez que aumenta en la entrada de nuestra simulación hasta igualarse, esto se debe a que el flujo se encuentra en régimen subcrítico lo que produce que los efectos de la presa se propaguen aguas arriba de la presa.

A continuación se muestra las componentes de velocidad y su módulo, con las componentes de la velocidad y las líneas de corriente se observa la formación de remolinos que produce la sedimentación cerca de la presa, este efectos será mayor en las compuertas cerradas puesto que retienen el sedimento, el módulo de velocidad es necesario para realizar el análisis de Froude y el estudio básico de Shields sobre movimiento de sedimento.

Por último, acerca del trabajo futuro que se puede realizar sobre nuestro estudio, podemos llegar a la conclusión según el método de Shields que para arena se produce resuspensión de sedimentos para caudales altos, aunque la mayoría del sedimento se movería en el fondo hasta llegar a la presa, donde estos sedimentos junto a caudales pueden provocar vibraciones en la presa que provoquen daños estructurales y mecánicos.

7. Bibliografía del Trabajo Fin de Grado

7.1 Publicaciones

- S. Lawrence Dingman. *"Fluvial Hydraulics"*. Oxford University Press, 2009.
- P. Bohórquez. *"Estudio del movimiento de fluidos incompresibles con transporte de sedimentos en canales abiertos"*. Universidad de Málaga, 2003.
- J.-P. Vila. *"Simplified godunov schemes for 2 x 2 systems of conservation laws"*. SIAM J. Numer. Anal., 23(6):1173-1192, December 1986.
- E.F. Toro. *"Shock-capturing methods for free-surface shallow flows"*. John Wiley, 2001.
- S. K. Godunov. *"A difference method for numerical calculation of discontinuous solutions of the equations of hydrodynamics"*. Math. Sbornik, 47:271-306, 1959.
- F. couderc, R. Madec, J. Monnier and J.-P. Vila. *"DassFlow v2.00.00: User and Developer Guide"*. Toulouse, 2013.
- R. Cordon, *"Simulación numérica 1D y 2D de la dinámica fluvial del río la Navisence durante la descarga del glaciar Zinal (Alpes suizos)"*, Junio 2014.
- P. Ybars. *"La sedimentación en embalses. Medidas preventivas y correctoras"*. Dirección de Medio Ambiente y Calidad, Endesa Servicios, S. L.
- Departamento de Ingeniería Mecánica y Minera. *"Prácticas de Mecánica de Fluidos"*. Área de Mecánica de Fluidos. Curso 2011/2012.
- J. López, J. Alavez-Ramírez, J.L. Hernández. *"Solución numérica del modelo de Saint-Venant vía volúmenes finitos"*. Universidad Juárez Autónoma de Tabasco, DACB.
- C. Canuto, Hussaini M.Y., Quarteroni A., Zang Th.A. *"Spectral Methods Evolution to Complex Geometries and Applications to Fluid Dynamics"*. Scientific Computation 2007.

- Nian-Sheng C., Yee-Meng C. “*Analysis of Initiation of Sediment Suspension from Bed Load*”. Industriales Málaga 03/10/15.
- F. Couderc, J. Monnier, J.-P. Vila, K. Larnier, R. Madec, D. Dartus. “*Robust finite volume schemes and variational inversions for 2D shallow water models. Application to flood plain dynamics*”. 2015.

7.2 Referencias

[1]

<http://foros.embalses.net/forumdisplay.php/57-Guadalquivir> /
<http://miquellopez63.blogspot.com.es/2011/11/presa-del-encinarejo.html>

[2]

http://www.ciccp.es/webantigua/icitema/comunicaciones/Tomo_I/T1p847.pdf

[3]

R. Cerdón, Simulación numérica 1D y 2D de la dinámica fluvial del río la Navisence durante la descarga del glaciar Zinal (Alpes suizos), Junio 2014.

[4]

http://www.juntadeandalucia.es/medioambiente/site/rediam/menuitem.04dc44281e5d53cf8ca78ca731525ea0/?vgnextoid=e87cd8cb9b1ec110VgnVCM1000001325e50aRCRD&vgnnextchannel=48f87d087270f210VgnVCM1000001325e50aRCRD&vgnnextfmt=rediam&lr=lang_es

[5]

<http://www.chguadalquivir.es/opencms/portalchg/laDemarcacion/guadalquivir/descripcion/caracteristicasFisicas/>

[6]

<https://www.google.com/maps/@38.04495,-4.16929,4299m/data=!3m1!1e3> /
Aplicación Google Earth.

[7]

Software de modelado digital Global Mapper 15.

[8]

<http://es.climate-data.org/location/884659/>

[9]

<http://sig.magrama.es/snczi/>

[10]

<https://hal.archives-ouvertes.fr/hal-01120285/document>

[11]

<http://es.wikibooks.org/wiki/Hidrosistemas/Hidr%C3%A1ulica>

/

[http://es.wikipedia.org/wiki/N%C3%BAmero de Froude](http://es.wikipedia.org/wiki/N%C3%BAmero_de_Froude)

[12]

[http://es.wikipedia.org/wiki/Diagrama de Moody](http://es.wikipedia.org/wiki/Diagrama_de_Moody)