



UNIVERSITAT
POLITÈCNICA
DE VALÈNCIA

ESCUELA TÉCNICA SUPERIOR
DE INGENIEROS DE CAMINOS,
CANALES Y PUERTOS



***TFM: DIAGNÓSTICO Y ESTUDIO DE SOLUCIONES DE
LA CAPTACIÓN Y TRATAMIENTO DE ESCORRENTÍAS
PLUVIALES EN LA UNIVERSIDAD DE LUND (SUECIA)***

TRABAJO FINAL DE MÁSTER JUNIO 2017

MÁSTER EN INGENIERÍA DE CAMINOS, CANALES Y PUERTOS

CURSO ACADÉMICO 2016/2017

ALUMNO

CASTEJÓN ZAPATA, MARÍA

TUTOR

ANDRÉS DOMÉNECH, IGNACIO

ÍNDICE GENERAL

MEMORIA

ANEJOS

ANEJO 1: ANTECEDENTES

ANEJO 2: DESCRIPCIÓN DEL ÁREA DE ESTUDIO

ANEJO 3: DIAGNÓSTICO CUALITATIVO

ANEJO 4: DIAGNÓSTICO HIDROLÓGICO

ANEJO 5: ANÁLISIS DE ALTERNATIVAS

ANEJO 6: ANÁLISIS DE LA SOLUCIÓN PROPUESTA

ANEJO 7: VALORACIÓN ECONÓMICA

APÉNDICES

APÉNDICE 1: CARACTERÍSTICAS DEL TERRENO

APÉNDICE 2: CARACTERÍSTICAS DE LOS EVENTOS

APÉNDICE 3: VOLÚMENES Y PROBABILIDAD DE NO EXCEDENCIA EN HUMEDAL Y ESTANQUE PARA LOS EVENTOS DE ESTUDIO DE SITUACIÓN ACTUAL.

APÉNDICE 4: VOLÚMENES Y PROBABILIDAD DE NO EXCEDENCIA EN HUMEDAL Y ESTANQUE PARA LOS EVENTOS DE ESTUDIO TRAS LLEVAR A CABO LA ALTERNATIVA ADOPTADA

APÉNDICE 5: HIETOGRAMA DE DISEÑO

PLANOS

PLANO 1: LOCALIZACIÓN

PLANO 2: EMPLAZAMIENTO

PLANO 3: TOPOGRAFÍA

PLANO 4: USOS DEL SUELO

PLANO 5: BATIMETRÍA Y MUESTREO

PLANO 6: SUBCUENCAS

PLANO 7: SISTEMA DE COLECTORES EXISTENTES

PLANO 8: DESCRIPCIÓN DEL AUMENTO DE LA CUENCA

PLANO 9: ALTERNATIVAS

PLANO 10: ACTUACIONES PARA EL AUMENTO DE LA CUENCA

*PLANO 11: ACCTUACIONES PARA LA PROTECCIÓN CONTRA
INUNDACIONES*

MEMORIA

ÍNDICE

1. INTRODUCCIÓN, ANTECEDENTES E INFORMACIÓN CONSULTADA	3
1.1 CONTEXTUALIZACIÓN	3
1.2 INTRODUCCIÓN	3
1.3 PROBLEMÁTICA	4
1.4 ANTECEDENTES.....	5
1.5 FUENTE Y RECOGIDA DE INFORMACIÓN	5
2. OBJETIVOS.....	5
3. DESCRIPCIÓN DE LA ZONA DE ESTUDIO	6
3.1 DESCRIPCIÓN FÍSICA.....	6
3.2 DELIMITACIÓN DE LAS CUENCAS Y SUBCUENCAS	8
3.3 BATIMETRÍA DEL ESTANQUE Y DEL HUMEDAL.....	10
3.3.1 Humedal	10
3.3.2 Estanque.....	13
4. DIAGNÓSTICO CUALITATIVO	13
4.1 MARCO TEÓRICO	13
4.2 LEGISLACIÓN Y UMBRALES	14
4.3 INSPECCIÓN IN SITU Y PRIMER ANÁLISIS.....	15
4.3.1 Inspección in situ	15
4.3.2 Análisis de partida	16
4.4 TOMA DE MUESTRA Y RESULTADOS	17
4.4.1 Muestreo	17
4.4.2 Resultados análisis del agua	18
4.4.3 Resultado análisis de los sedimentos	19
4.5 FLORA Y FAUNA	20
4.6 CONCLUSIONES.....	21
5. DIAGNÓSTICO HIDROLÓGICO	22
5.1 INTRODUCCIÓN	22
5.2 MODELO DE ESTUDIO	22
5.2.1 Marco teórico	22
5.2.2 Datos de partida	23
5.2.3 Elementos físicos del modelo	24
5.2.4 Otros elementos del modelo	27
5.3 RESULTADOS	30
5.3.1 Introducción	30
5.3.2 Número de eventos y características de los mismos.....	31
5.3.3 Probabilidad de excedencia de los volúmenes del humedal y estanque	33
5.3.4 Desagüe del estanque y el humedal	34

5.4	CONCLUSIONES.....	34
6.	ANÁLISIS DE LAS ALTERNATIVAS	35
6.1	INTRODUCCIÓN	35
6.2	ALTERNATIVAS PARA LA MEJORA DE LA SITUACIÓN ACTUAL.....	35
6.2.1	Disminución de la cota de solera del cauce natural	35
6.2.2	Aumento de la cota máxima del humedal.....	37
6.3	ALTERNATIVAS PARA LA AMPLIACIÓN DE LA CUENCA DRENANTE	40
6.3.1	Aumento de la cuenca drenante	40
6.3.2	Actuaciones tras el aumento de la cuenca	42
6.4	CONCLUSIONES.....	45
7.	PROPUESTA Y DESARROLLO DE LA SOLUCIÓN ADOPTADA	46
7.1	INTRODUCCIÓN	46
7.2	ACTUACIONES.....	46
7.2.1	Aumento bordillo.....	46
7.2.2	Rampas de acceso	47
7.2.3	Captación y encauzamiento.....	48
7.2.4	Disminución cota de solera del cauce natural	53
7.2.5	Ampliación del volumen del humedal	53
7.3	COMPROBACIÓN	54
8.	VALORACIÓN ECONÓMICA.....	55
9.	CONCLUSIONES.....	56
10.	REFERENCIAS	57

1. INTRODUCCIÓN, ANTECEDENTES E INFORMACIÓN CONSULTADA

1.1 CONTEXTUALIZACIÓN

El presente Trabajo Final de Máster forma parte de un estudio llevado a cabo gracias a una beca Erasmus Plus, la cual permite realizar prácticas en países de la Unión Europea. En este caso, las prácticas se desarrollaron en la Universidad de Lund (LTH), en el departamento de “Water Resources Engineering”. Por medio de un equipo multidisciplinar, y durante los 7 meses de su duración, se pretende estudiar y solucionar los problemas de calidad de aguas de un humedal artificial situado dentro de la propia Universidad de Lund, siendo esta entidad la responsable de la financiación del proyecto.

Debido a los diferentes objetivos del proyecto, el trabajo es llevado a cabo gracias a una colaboración entre Joanna Marchlewska Moberg (bióloga), Fadih Alzaghamim (ingeniera química) y María Castejón Zapata (ingeniera Civil). Sin embargo, este Trabajo Final de Máster se centra en el trabajo desarrollado por la alumna María Castejón Zapata y por lo tanto no incluye las partes relacionadas con la biodiversidad del humedal y la interacción del agua y los sedimentos, llevadas a cabo por las otras componentes del grupo.

1.2 INTRODUCCIÓN

El humedal artificial de estudio, denominado Sjön-Sjön, se encuentra en la Universidad de Lund, situada al noreste de la ciudad de Lund (Suecia), tal y como se muestra en la *figura 1.1*.

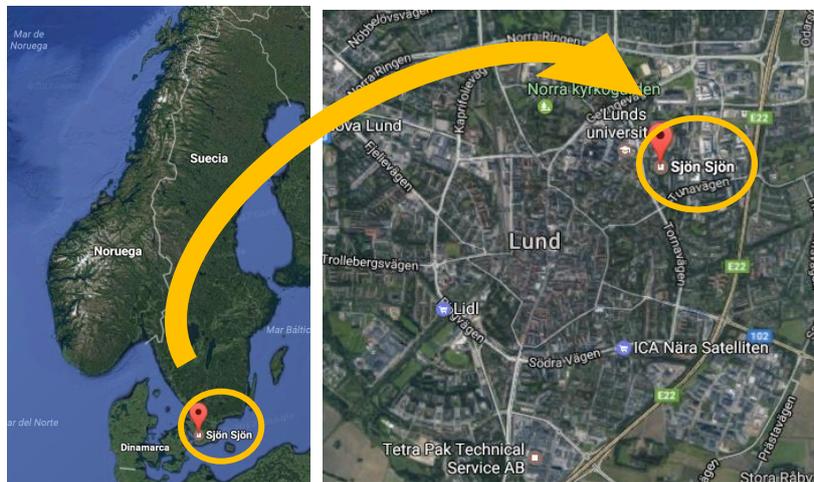


Figura 1.1: Localización Sjön-Sjön

La función del humedal de estudio es la de recoger las aguas pluviales de una parte de la propia universidad y las aguas que vierte un estanque aguas arriba del mismo (tal y como se describe en el Anejo 2), sirviendo como elemento de drenaje sostenible. Estos elementos se utilizan, no solo para laminar la avenida, sino también como tratamiento de la escorrentía superficial, eliminando gran cantidad de contaminantes. Además, hace unos años, se construyó una serie de bancos y zonas de barbacoa alrededor del humedal gracias a un proyecto de mejora paisajística y de amenidad de las zonas verdes aledañas, intentando fomentar el uso dicha zona.

1.3 PROBLEMÁTICA

Sin embargo, aunque las zonas verdes de los alrededores del humedal se encuentran en muy buenas condiciones, el propio humedal presenta una serie de problemas, expuestos a continuación:

- Se observa como no se lleva a cabo un correcto mantenimiento del humedal, encontrando basura dentro del mismo, tal y como se muestra en la *imagen 1.1*.



Imagen 1.1: Limpieza del humedal

- Además de la basura que se encuentra dentro del humedal, se observa una elevada turbidez del agua, la cual impide ver las características del fondo del mismo, incluso en zonas poco profundas.
- Tampoco se observan plantas acuáticas, las cuales en estos casos, ayudan a la eliminación de los contaminantes arrastrados por el agua de lluvia y al fomento de la biodiversidad.
- Este humedal desagua en el sistema de colectores de aguas pluviales de la propia ciudad, que a su vez vierte sus aguas en el río que pasa por el sur de Lund. Debido a que esta agua no es tratada antes de que llegue al medio natural, nadie se encarga de controlar la calidad de aguas, por lo que se desconoce si el mal aspecto de este humedal se debe a algún contaminante o no.
- Además, a principio del curso académico, los nuevos alumnos llevan a cabo una serie de juegos acuáticos dentro del mismo, no habiéndose estudiado si la calidad del agua es adecuada para baño o no.

- También se desconoce la probabilidad de que se supere la capacidad de almacenamiento del estanque y del humedal. Debido al proceso de urbanización del norte de la ciudad, se están llevando a cabo numerosos estudios para captar el agua de lluvia superficialmente, a través de sistemas de drenajes sostenibles. Por ello se crea la necesidad de estudiar la capacidad de estos dos cuerpos de agua y la posibilidad de ampliar la cuenca drenante.

1.4 ANTECEDENTES

Debido al desconocimiento sobre la calidad del agua del humedal, la universidad encargó un análisis del agua del humedal a principios de diciembre del 2015. Sin embargo, nadie se hizo cargo de estudiar las causas de esos resultados de calidad, y de crear un plan de acción.

Los resultados se especifican en el anejo 3 y se utilizan como dato de partida del estudio.

1.5 FUENTE Y RECOGIDA DE INFORMACIÓN

Para llevar a cabo este trabajo se han requerido los datos expuestos a continuación. Estos se utilizan para realizar los estudios pertinentes y así alcanzar los objetivos propuestos (especificados en el apartado 2):

- Datos cinco-minutales de lluvia, suministrados por la Universidad de Lund.
- Datos climatológicos (temperatura, humedad relativa, velocidad del viento y radiación del sol), obtenidos mediante la aplicación web del SMHI (Sveriges meteorologiska och hydrologiska institut).
- Datos del funcionamiento del drenaje en la cuenca de estudio, suministrado por Akademiska Hus, empresa encargada del mantenimiento de la universidad.
- Estudios de campo, realizados en el propio humedal y descritos en el Anejo 3.
- Modelo de elevación digital (DEM), proporcionado por el centro de sistemas de información geográfica (GIS center) de la Universidad de Lund.

2. OBJETIVOS

Una vez expuesta la problemática asociada a la mala gestión del humedal, se presentan los objetivos que se pretenden estudiar y alcanzar tras la realización del trabajo.

- Describir la zona de estudio para poder así desarrollar un análisis exhaustivo de la situación de partida.
- Establecer la calidad del agua y estudiar si esta se podría reutilizar para irrigación de las zonas verdes y arboles aledaños y para la limpieza de calles y camiones pertenecientes

a la empresa de mantenimiento Akademiska Hus, cuyas oficinas y almacenes se encuentran a escasos metros de este humedal.

- Determinar el riesgo de inundación, tanto del estanque como del humedal, para así establecer las medidas de actuación.
- Establecer la posibilidad de aumentar la cuenca drenante del humedal, para recolectar un mayor volumen de escorrentía, mitigando de esta manera el infradimensionamiento del sistema de colectores pluviales de la ciudad.
- Proponer alternativas para solucionar los problemas cualitativos y cuantitativos y establecer el uso de sistemas de drenaje sostenibles (SuDS) para gestionar la escorrentía superficial de la cuenca.

3. DESCRIPCIÓN DE LA ZONA DE ESTUDIO

3.1 DESCRIPCIÓN FÍSICA

La cuenca de estudio está formada por dos subcuencas, una más pequeña aguas arriba (6181 m²) donde se capta y almacena el agua en el estanque y una, aguas abajo (35.055 m²), en la que se capta y almacena el agua en el humedal. La cuenca aguas arriba tiene como punto de desagüe el cauce natural que une el estanque con el humedal. La cuenca de aguas abajo desagua a través de una tubería de hormigón situada en el propio cuerpo de agua.

Ambas subcuencas están formadas por los siguientes elementos, representados gráficamente en el Plano 4 de usos del suelo y en la *figura 2.1*. Además en la *figura 2.2* se representa la dirección del flujo en superficie.

- Cuatro edificios.
- Zonas verdes.
- Calles asfaltadas y un aparcamiento.
- Estanque aguas arriba, el cual desagua en lámina libre por medio de un cauce natural al humedal de aguas abajo. A este estanque drena uno de los cuatro edificios y una pequeña área de zona verde.
- El humedal principal el cual recoge, en última instancia, las aguas pluviales de la cuenca, y las evacua a través de una tubería de salida. A esta cuenca se le denominará cuenca aguas abajo.



Figura 3.1: Usos del suelo de la cuenca de estudio

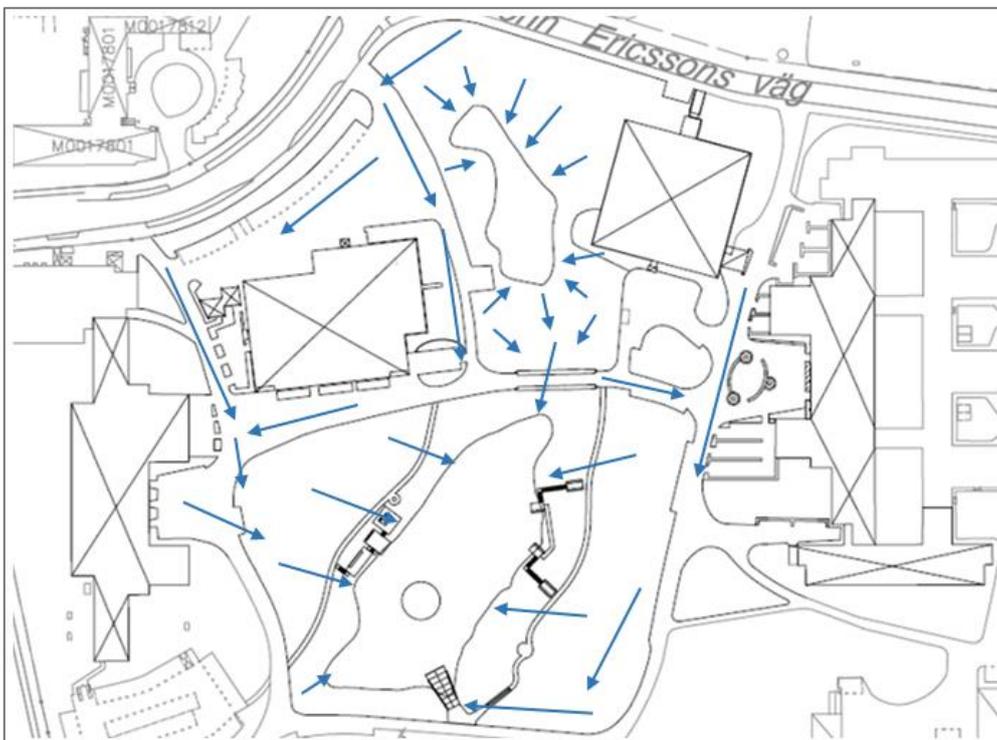


Figura 3.2: Dirección del flujo en superficie

A modo de resumen, se exponen a continuación las áreas aproximadas de cada tipo de suelo en las dos subcuencas.

Zona	Área (m ²)	
	Cuenca Aguas abajo	Cuenca Aguas arriba
Zonas verdes	15934.35	3578.44
Edificios	7840.37	1726.21
Calles	8826.76	0
Cuerpo agua	2453.93	876.62

Tabla 3.1: Área de los diferentes usos del suelo

Las áreas de los dos cuerpos de agua varían en función de su volumen almacenado. Por ello el área representada en la *tabla 2.1* es aproximada.

Conociendo estos valores se pone de manifiesto que aproximadamente el 45% de la superficie de la cuenca es impermeable.

3.2 DELIMITACIÓN DE LAS CUENCAS Y SUBCUENCAS

Para definir la cuenca que drena al estanque y humedal se utiliza el modelo de elevación digital (DEM), con una precisión de 2 metros proporcionado por el centro GIS de la universidad, representando la topografía de la zona de estudio en el Plano 3. Con esta información y mediante la utilización del *software ArcMap 10.3.1* se delimita la cuenca que debido a las pendientes del terreno drenaría en ambos cuerpos de agua, mostrándose ambas en el Plano 6. Sin embargo, también se tiene en cuenta la disposición de los imbornales y tuberías que captan el agua pluvial para delimitar la cuenca de estudio final. En la *figura 2.2* se representa en azul la cuenca aguas arriba que drena al estanque y en rojo la cuenca que drena al humedal.

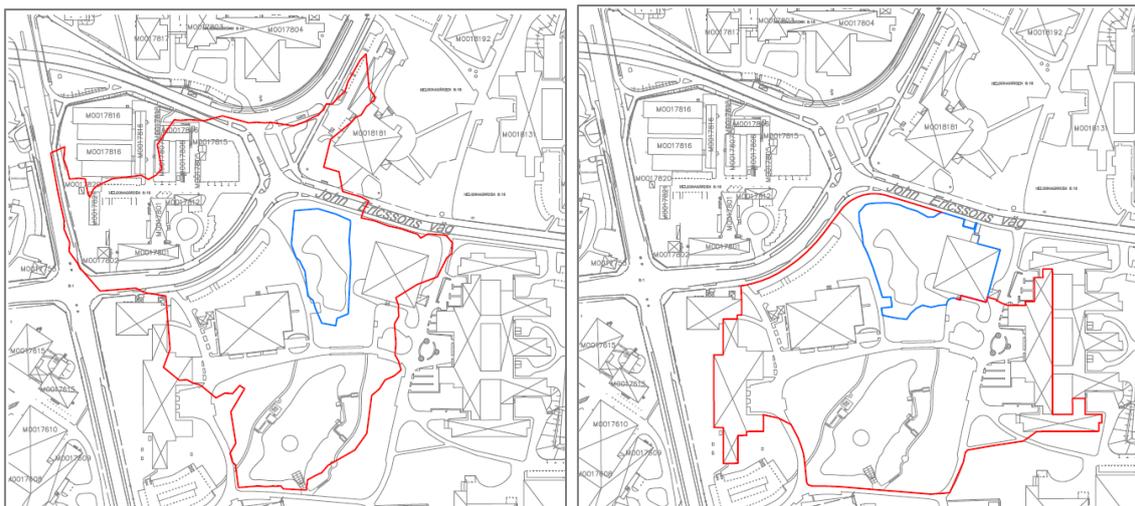


Figura 3.3: Subcuencas naturales (figura de la izquierda) y subcuencas teniendo en cuenta sistemas de drenaje (figura de la derecha)

Una vez delimitadas ambas subcuencas, estas se dividen en cuencas más pequeñas para realizar un estudio detallado a partir del *software SWMM 5.1*. Esta división detallada se lleva a cabo

teniendo en cuenta la localización de imbornales y colectores como puntos de desagüe de cada subcuenca.

En la *figura A2.3* y en la *tabla A2.1* se representa la delimitación de las subcuencas y las características de las mismas, teniendo en cuenta la disposición de los elementos de drenaje, los cuales se encuentran detallados en el Plano 6.

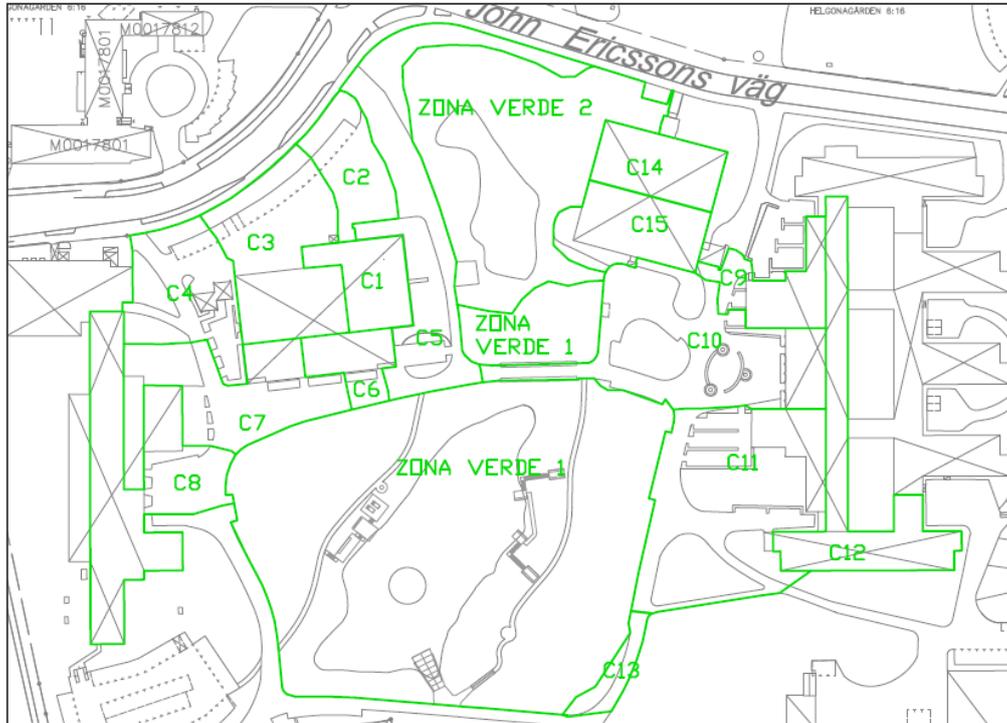


Figura 3.4 Subcuencas en la que la captación de aguas pluviales se lleva a cabo a partir de sistemas de drenaje.

A continuación se representan las características de cada una de estas subcuencas:

Subcuenca	Área (m ²)	Fracción impermeable (%)	Pendiente (%)
C1	700.66	100	2
C2	828.67	78.07	4.337
C3	1919.9	87.99	4.58
C4	1403.5	60.41	6.48
C5	2342.58	48.52	7.94
C6	523.93	94.73	3.28
C7	1816.32	79.04	3.40
C8	2375.39	96.07	2.37
C9	765.89	95.72	2.19
C10	2814.99	75.87	5.98
C11	3279.85	57.67	4.19
C12	1627.30	100	2
C13	286.12	0	11.16

C14	828.79	100	2
C15	1058.82	79.45	5.08
Zona Verde 1	10556	0	23.27
Zona Verde 2	3472	0	21.84

Tabla 3.2: Características de cada subcuenca

Cuando ocurre un episodio de lluvia, las zonas verdes aledañas producen escorrentía superficial que drena a los cuerpos de agua directamente por acción de la gravedad, es decir el agua no es captada por ningún elemento de drenaje.

3.3 BATIMETRÍA DEL ESTANQUE Y DEL HUMEDAL

Como se describe en el Anejo 4 de diagnóstico hidráulico, para modelizar la capacidad de almacenamiento de agua en el estanque y humedal es necesario conocer su batimetría para poder definir las curvas de almacenaje de los mismos. Sin embargo, no se disponía de estos datos para el humedal, por lo que fue necesario realizar trabajo de campo para determinar la profundidad de una serie de puntos y posteriormente interpolarlos. En el Plano 5 se representa gráficamente la batimetría y los puntos de muestreo.

3.3.1 Humedal

Aunque se dispone de un modelo de elevación digital (DEM), con resolución de 2 metros, este no es lo suficientemente preciso para determinar la propia batimetría del humedal.

Por ello, se decide medir la profundidad de una serie de puntos del humedal, representados en la *figura 2.4*, para después realizar una interpolación y obtener así la batimetría del mismo. Dentro de los análisis de variación espacial, los interpoladores IDW (Inverse Distance Weighting) y Kriging son los más utilizados, siendo estos los elegidos para el estudio.

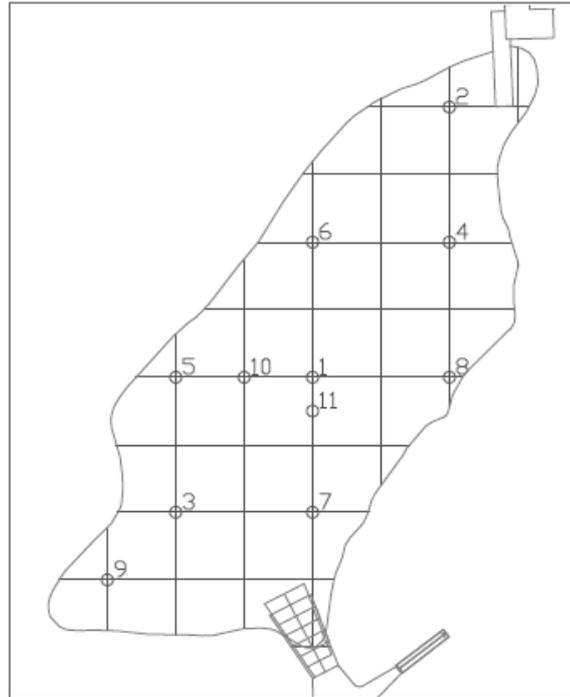


Figura 3.5: Puntos de muestreo del humedal

A continuación se representan las profundidades y coordenadas de estos puntos:

Puntos de muestreo	Profundidad (m)	Coordenada x	Coordenada y
1	1.7	387434.2	6175309.21
2	1.7	387454.2	6175349.21
3	1.3	387414.2	6175289.21
4	1.3	387454.2	6175329.21
5	1	387414.2	6175309.21
6	1.5	387434.2	6175329.21
7	1.6	387434.2	6175289.21
8	1	387454.2	6175309.21
9	1	387404.2	6175279.17
10	1.9	387424.2	6175309.21
11	2.5	387434.21	6175304.205

Tabla 3.3: Profundidad y coordenadas de los puntos de muestreo

Para calcular las cotas de estos puntos se toma como punto de referencia fijo el inicio de las escaleras de acceso al humedal, con una cota de 60 metros. Desde este punto se calcula el desnivel hasta la lámina de agua, la cual el día de medida se encontraba en 58,5 metros.

A partir de la cota de la lámina de agua y la profundidad de los puntos, se obtuvo la cota de cada uno de los puntos de muestreo, representados en la *tabla A2.3*.

Puntos de muestreo	Cota (m)
1	56.8
2	56.8
3	57.2
4	57.5
5	57
6	56.9
7	57.5
8	57.5
9	56.6
10	56
11	58.5
12	57.5

Tabla 3.4: cota de los puntos de muestreo del humedal

A partir de estos puntos se realiza la interpolación con los dos métodos nombrados anteriormente, obteniendo para ambos un raster con resolución de 0.2 metros. Con este se delimitan las curvas de nivel del fondo del humedal, representándose estas en la *figura 2.5*. Una vez obtenidas las curvas de nivel, se comprobaron su similitud con la realidad in situ, siguiendo el proceso que se especifica en el Anejo 2.



Figura 3.5: Batimetría obtenida a partir de la interpolación IDW (figura de la izquierda) y Kriging (figura de la derecha)

Una vez obtenidas las dos batimetrías se obtuvo el volumen de agua por el método IDW (3546,8 m³) y por el método de interpolación Kriging (4324,6 m³).

Al estudiar in situ la profundidad en diferentes zonas, se comprueba como el modelo IDW infravaloraba la profundidad del humedal en la parte noroeste del mismo, siendo este el motivo por el cual el volumen mediante este método es inferior a la interpolación Kriging. Por lo cual se decidió utilizar como método de interpolación este último, ya que demuestra una mejor representación de la realidad.

3.3.2 Estanque

El proceso de cálculo del volumen de almacenamiento en el estanque resulta más sencillo ya que no hay tanta variación de profundidad en el mismo y por lo tanto no es necesario obtener la batimetría para calcular dicho volumen. Simplemente se corrobora la información proporcionada por el responsable de mantenimiento de los elementos de drenaje de la universidad, siendo esta que en prácticamente todo el estanque la profundidad es constante a una cota de 63 metros aproximadamente.

4. DIAGNÓSTICO CUALITATIVO

4.1 MARCO TEÓRICO

La contaminación se define en la Ley 29/1985 de Aguas como “la acción y el efecto de introducir materias o formas de energía, o inducir condiciones en el agua que, de modo directo o indirecto, impliquen una alteración perjudicial de su calidad en relación con los usos posteriores o con su función ecológica” (Doménech, 2002).

Para llevar a cabo cualquier estudio de la calidad del agua de un lago o humedal, es necesario identificar las posibles alteraciones físicas, químicas y biológicas de sus aguas. En el Anejo 3 se especifican, de forma teórica, cuales son este tipo de alteraciones y los efectos negativos en agua y sedimentos que producen.

También es necesario el estudio de la flora y fauna de un ecosistema acuático, ya que también pueden ser indicadores de calidad. De hecho, numerosos autores describen la existencia de dos estados alternativos para los lagos someros o humedales (L. Loughheed, Crosbie, & Chow-Fraser, 1998) :

- Estado de agua limpia, dominado por vegetación sumergida
- Estado de agua turbia, dominado por fitoplancton.

Para la restauración de este último se requiere la identificación y eliminación de los elementos de presión que inició este cambio.

Aunque se ha comentado la importancia de estudiar las alteraciones biológicas para definir el estado de calidad de un cuerpo de agua, en el presente trabajo no se comentarán dichas alteraciones biológicas, ya que este estudio forma parte de un proyecto de investigación llevado a cabo por otro de los miembros del equipo de investigación.

4.2 LEGISLACIÓN Y UMBRALES

Para determinar el estado de la masa de agua se adoptan los umbrales propuestos por una serie de directivas europeas. Para los umbrales de los sedimentos, se adoptan los estándares de la “Swedish Environmental Protection Agency”. Se presenta a continuación la legislación utilizada para establecer los parámetros y características límite de agua y sedimentos:

- Directiva 2000/60/CE por la que se establece un marco comunitario de actuación en el ámbito de la política de aguas.
- Directiva 76/160/CEE del Consejo, de 8 de diciembre de 1975, relativa a la calidad de las aguas de baño.
- DIRECTIVA 2013/39/UE DEL PARLAMENTO EUROPEO Y DEL CONSEJO de 12 de agosto de 2013 por la que se modifican las Directivas 2000/60/CE y 2008/105/CE en cuanto a las sustancias prioritarias en el ámbito de la política de aguas.
- Para el límite de la turbidez se utiliza el REAL DECRETO 1620/2007, de 7 de diciembre, por el que se establece el régimen jurídico de la reutilización de las aguas depuradas, en el que se especifica la turbidez que debe de llevar el agua para la reutilización de la misma en jardines y limpieza.
- Environmental quality criteria, Swedish Environmental protection agency.

A continuación se presentan los umbrales utilizados para los análisis de agua y sedimentos.

Umbrales en la calidad de aguas	
Parámetro	Umbrales
Sólidos suspendidos (mg/l)	< 25
Turbidez (NTU)	<10
Conductividad (µS/cm)	180-400
pH	Entre 6 -9
DQO (mg/l)	<125
COT (mg/l)	<10
Fósforo total (mg/l)	<0.2-0.4
NH4 (mg/l)	<0.04-1
NO3 (mg/l)	<10
Nitrógeno Total (mg/l)	<15
Oxígeno disuelto	110-50% o >8 mg/l
Al (mg/l)	< 5
As (mg/l)	<0.1
Cd (mg/l)	<0.01
Cr (mg/l)	<0.1
Cu (mg/l)	<0.04
Hg (µg/l)	<0.07
K (mg/l)	<10
Mg (mg/l)	<30
Mn (mg/l)	<0.2

Na (mg/l)	<20
Ni (mg/l)	<0.2
Pb (mg/l)	<0.007
Zn (mg/l)	<0.03 -2

Tabla 4.1: Umbrales de calidad de aguas asumidos para el estudio del humedal.

Umbrales de metales pesados	
Muestras	Umbral (mg/kg)
As	<35
Cd	<5
Cr	<80
Cu	<70
Hg	<0.15
Ni	<30
Pb	<35
Zn	<120

Tabla 4.2: Umbrales de calidad de metales pesados en sedimentos asumidos para el estudio del humedal.

4.3 INSPECCIÓN IN SITU Y PRIMER ANÁLISIS

4.3.1 Inspección in situ

En primer lugar, y antes de decidir qué tipo de pruebas y análisis llevar a cabo a los dos cuerpos de agua, se realiza una visita de campo para efectuar una primera inspección.

En el estanque se encuentran plantas acuáticas en el fondo y se detecta que la turbidez no es elevada, ya que se puede apreciar las mismas. En este tipo de estanques y humedales artificiales, las plantas acuáticas fomentan la fitorremediación, tratando contaminantes y consumiendo los nutrientes antes de que lleguen al medio. Por ello, observar plantas acuáticas en cantidades normales constituye un buen indicio. Sin embargo se detecta falta de mantenimiento y limpieza del mismo.

En cuanto al humedal, no solo se descubre acumulación de basura, sino que la turbidez es mucho mayor, no pudiéndose apreciar en el fondo. Al inspeccionar las orillas también se comprueba cómo no hay ninguna planta acuática.

Debido a que, a simple vista, el humedal presenta mayores problemas, y a que es el cuerpo de agua donde los estudiantes se bañan y por donde desagua el agua almacenada, se decide realizar un análisis más exhaustivo a dicho cuerpo de agua (análisis de sus aguas y sedimentos y estudios de su flora y fauna), para determinar la existencia de posibles problemas y así decidir si se requiere realizar el mismo estudio para el estanque. La explicación a esta decisión es que el estanque vierte sus aguas al humedal, por lo que si no se detectan contaminantes en el humedal, no tiene sentido el realizar el mismo análisis para el estanque.

4.3.2 Análisis de partida

Como ya se comentó en el apartado de antecedentes de este mismo documento, uno de los datos de los que se dispone es un estudio de varios parámetros de calidad del agua del humedal, realizado por la Facultad de Ingeniería Química de la Universidad de Lund, los cuales se recogen en la siguiente tabla:

Parámetro	Valor
Sólidos suspendidos (mg/l)	21.6
Turbidez (NTU)	24
pH	7.2
DQO (mg/l)	24.3
Carbón orgánico total (mg/l)	0.77
Fósforo total (mg/l)	0.07
PO4 (mg/l)	0.045
NH4 (mg/l)	0.3
NO3 (mg/l)	0.71
HCO3 (mg/l)	0.71
Al (mg/l)	0.016
As (mg/l)	0.004
Cd (mg/l)	0
Cr (mg/l)	0
Cu (mg/l)	0.007
Pb(mg/l)	0
Fe (mg/l)	0.057
Hg (mg/l)	0.032
Mg (mg/l)	4.89
Mn (mg/l)	0.01
Ni (mg/l)	0.0004
Zn (mg/l)	0.029

Tabla 4.3: Primer análisis de la calidad del agua del humedal

Como se puede apreciar en este primer estudio, no se detectan metales pesados como el plomo, cromo y cadmio en el agua, y los valores del resto de metales se encuentran por debajo de los umbrales establecidos, exceptuando el mercurio, que sí sobrepasa los límites especificados por la normativa.

Al observar el valor tan elevado de este metal, se decide estudiar la posible fuente de contaminación de la cuenca, ya que el mercurio se puede encontrar en algunos pesticidas. Sin embargo, al entrevistar a los responsables del mantenimiento de las zonas verdes de la cuenca confirmaron que no se utilizaba ningún pesticida que contuviera mercurio.

También se comprobó como la turbidez sobrepasaba los límites establecidos, justificando lo que a simple vista se intuía.

Debido a que este estudio fue llevado a cabo en 2015, se decidió contratar los servicios de un laboratorio profesional para que analizara los metales pesados del agua y los sedimentos del humedal, y así corroborar los resultados.

Por lo tanto, tras el estudio de este primer análisis, se decide llevar a cabo las siguientes pruebas:

- Análisis del agua
 - Encargados a un laboratorio profesional: Análisis de los metales pesados (Hg, As, Ni, Cu, Pb, Zn, Cd, Mn, Al, Ca, Fe, K, Mg, Na y S), carbón orgánico total y nitrógeno total.
 - Realizados en el propio laboratorio del departamento: Fósforo total, pH, oxígeno disuelto, NH₄, NO₃ y conductividad.

- Análisis de los sedimentos

Los análisis de los sedimentos, se encargan al mismo laboratorio que los análisis del agua, ya que en el laboratorio del departamento no se dispone de equipo necesario para dichos análisis. Por ello se encargan los análisis de los metales pesados que en la directiva sueca se consideran como peligrosos: As, Cd, Cr, Cu, Hg, Ni, Pb, Zn.

4.4 TOMA DE MUESTRA Y RESULTADOS

4.4.1 Muestreo

Debido al tamaño del humedal se decide tomar dos muestras de agua en un único punto (el mismo donde se llevó a cabo el primer análisis). Las medidas del pH y el oxígeno disuelto se realizan in situ, ya que se dispone de aparatos portátiles de medida.

Sin embargo, en cuanto a los sedimentos, se tomaron dos muestras en 9 puntos repartidos a lo largo del humedal, tal y como se identifica en la *figura 4.1* y en el Plano 5, analizando los correspondientes a la capa superficial.

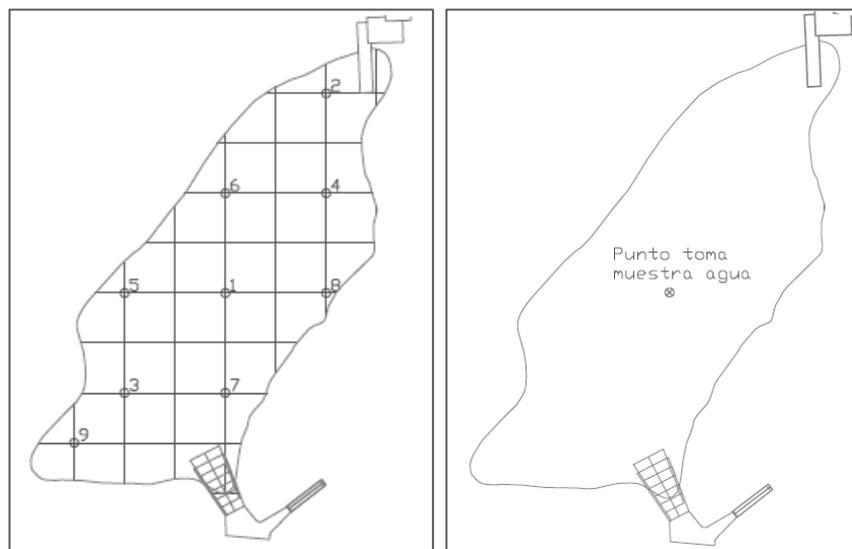


Figura 4.1: toma de muestras de sedimentos (izquierda) y de agua (derecha)

Al realizar la toma de muestras de sedimentos se observa que como en el fondo del humedal no hay ningún tipo de planta acuática.

4.4.2 Resultados análisis del agua

En la *tabla 4.3* se representan los resultados aportados por el laboratorio y los análisis llevados a cabo por el propio departamento.

Análisis del agua			
Elementos	Unidades	Valores	Umbral
pH		7.22	6-9
Turbidez	NTU	22	<10
NH4-N	mg/L	0.076	<0.04-1
Conductividad	μS/cm	317	180-400
NO3-N	mg/L	0.000	<10
TOC	mg/L	4.9	<10
DOQ	mg/L	23	<125
Oxígeno disuelto	%	92.5	110-50%
Oxígeno disuelto	mg/L	10.8	>8
TN	mg/L	1.371	<15
Al	mg/L	0.055	<5
As	mg/L	0.001	<0.1
Ca	mg/L	34.230	<32-160
Cd	mg/L	0.00	<0.01
Cr	mg/L	0.0002669	<0.1
Cu	mg/L	0.007	<0.04
Hg	mg/L	0.05	<0.07
K	mg/L	2.614	<10
Mg	mg/L	3.819	<30
Mn	mg/L	0.005	<0.2
Na	mg/L	8.726	<20
Ni	mg/L	0.007	<0.2
Pb	mg/L	0.001	<0.007
Zn	mg/L	0.006	<0.03

Tabla 4.3: Resultados análisis del agua del humedal

4.4.3 Resultado análisis de los sedimentos

Muestras	Metales pesados en mg/kg							
	As	Cd	Cr	Cu	Hg	Ni	Pb	Zn
1.1.S	0.00	0.00	0.02	0.18	0	0.01	0.04	0.18
1.2.S	0.00	0.00	0.02	0.43	0	0.02	0.07	0.38
2.1.S	0.00	0.00	0.01	0.12	0.000138	0.01	0.03	0.17
2.2.S	0.00	0.00	0.01	0.05	0.000120	0.01	0.02	0.15
3.1.S	0.00	0.00	0.03	0.32	0	0.03	0.06	0.62
3.2.S	0.00	0.00	0.03	0.23	0.000165	0.02	0.04	0.58
4.1.S	0.00	0.00	0.02	0.30	0.000169	0.02	0.04	0.35
4.2.S	0.00	0.00	0.04	0.18	0.000100	0.04	0.04	0.48
5.1.S	0.00	0.00	0.02	0.12	0.000118	0.01	0.03	0.33
5.2.S	0.00	0.00	0.02	0.13	0.000124	0.02	0.03	0.30
6.1.S	0.00	0.00	0.02	0.20	0.000209	0.02	0.04	0.57
6.2.S	0.00	0.00	0.03	0.27	0	0.03	0.05	0.55
7.1.S	0.00	0.00	0.03	0.23	0	0.02	0.05	0.54
7.2.S	0.00	0.00	0.03	0.32	0.000001	0.03	0.06	0.75
8.1.S	0.00	0.00	0.03	0.23	0.000120	0.03	0.04	0.57
8.2.S	0.00	0.00	0.02	0.19	0.000151	0.02	0.04	0.54
9.1.S	0.00	0.00	0.03	0.24	0.000157	0.02	0.05	0.51
9.2.S	0.00	0.00	0.03	0.21	0.000141	0.02	0.04	0.47
Umbral (mg/kg)	<35	<5	<80	<70	<0.15	<30	<35	<120

Tabla 4.4: Resultados análisis de los sedimentos del humedal

Se puede comprobar a partir de estos análisis que los contaminantes no sobrepasan los umbrales establecidos por las diferentes normativas utilizadas para el estudio. Incluso la cantidad de mercurio no sobrepasa el valor límite ni en el agua ni en los sedimentos. Por tanto se descartan los resultados del primer análisis proporcionado por la universidad.

Sin embargo sí que se sigue comprobando como el valor de turbidez sobrepasa el valor para su reutilización, tal y como indica el primer estudio. A parte de que la normativa no permite la reutilización del agua con unos niveles de turbidez tan elevados, este tipo de agua también puede producir obstrucciones en los elementos de limpieza e irrigación que se usan en estos casos. Además esta agua no es apta para irrigación de árboles y arbustos, debido a que pueden interferir en la fotosíntesis de las plantas al cubrir las hojas con las partículas en suspensión que producen dicha turbidez.

El valor de los nutrientes es bastante bajo, pudiendo ser este uno de los motivos por los que no se encuentran plantas acuáticas en el humedal.

Los valores de oxígeno disuelto se encuentran dentro del rango establecido. Esto es de vital importancia ya que no solo es necesario para todas las formas de vida, sino que se requiere para los procesos de purificación naturales, ya que facilita las formas de vida aeróbicas.

4.5 FLORA Y FAUNA

Como ya se comentó en apartados anteriores, no se descubre ningún tipo de planta acuática a lo largo del humedal. Sin embargo, a partir del estudio in situ con sensor de detector de peces, se descubren un gran número de carpas.



Imagen 4.1: Carpa común (*Cyprinus carpio*)

Este tipo de peces producen los siguientes problemas en lagos y humedales (L. Lougheed, Crosbie, & Chow-Fraser, 1998):

- La actividad de búsqueda de alimento en el fondo, fomenta la resuspensión de los sólidos y aumenta la turbidez del agua.
- Las carpas eliminan de forma directa las comunidades naturales de vegetación sumergida, las cuales fomentan la biodiversidad y eliminación de contaminantes. Esto ocurre porque, además de ser animales omnívoros y consumir las plantas acuáticas, su actividad aumenta la turbidez. Esto produce la muerte de las plantas del fondo al no recibir luz solar.
- De forma indirecta, las carpas producen la eliminación de ciertos tipos de zooplancton, como la *Daphnia*, ya que la elevada turbidez inhabilita a esta especie su ingesta de fitoplancton, eliminando del sistema acuático a estos heterótrofos que ocupan las primeras posiciones de consumidores en la cadena trófica.
- Debido a su gran resistencia y a su potencial invasora, en los lugares donde se ha introducido de forma artificial se considera una gran amenaza por competir con las especies autóctonas y alterar los equilibrios ecológicos.

En España, las carpas han sido incluidas dentro del grupo de especies exóticas invasoras, estando prohibida su introducción en el medio natural (REAL DECRETO 630/2013).

Por ello este tipo de animales supone un grave problema en el humedal de estudio, no solo produciendo la turbidez del agua, sino que también imposibilita la creación de biodiversidad dentro de este ecosistema acuático.

4.6 CONCLUSIONES

Una vez analizados los resultados del estudio de aguas y sedimentos del humedal, se llega a las siguientes conclusiones:

- La turbidez del humedal es el principal problema de calidad que sufre el mismo. Además este se debe a la acción de las carpas al buscar alimento en el fondo.
- Esta turbidez, además, impide el desarrollo de plantas acuáticas, las cuales crearían biodiversidad en el humedal.
- Debido a que no se encuentra ningún tipo de contaminante en el humedal, no se considera necesario estudiar la calidad del estanque, ya que este se encuentra aguas arriba y vierte sus aguas al humedal. Además al realizar una inspección in situ no se detecta ninguna carpa, comprobando el desarrollo de vegetación acuática en el estanque, y unos valores de turbidez adecuados.
- Los valores de mercurio en el primer estudio no coinciden con los valores del análisis más reciente. Aunque se pregunta a los responsables del mantenimiento y estos aseguran que no se utilizaban pesticidas, tampoco especificaron muchos más detalles. Por ello, una de las posibles causas de este valor anómalo es que en 2015 si se utilizaba algún pesticida con contenido en mercurio, cesando posteriormente su uso.
- Otro de los principales problemas que se detectan en el estanque y en el humedal es la falta de un correcto mantenimiento y limpieza de los mismos. Este problema fue discutido con el equipo de limpieza de la zona, mostrándole la cantidad de basura encontrada en la visita in situ.
- En cuanto a la restauración de la biodiversidad del humedal, se está llevando a cabo por uno de los componentes del grupo de investigación.
- Una de las principales conclusiones que se obtuvieron tras el estudio de los resultados es que se debían eliminar las carpas grandes del humedal. Por ello fue necesario ponerse en contacto con un club de pesca cercano para organizar un campeonato de pesca. Debido a las bajas temperaturas de Suecia en invierno, este campeonato se llevará a cabo este próximo verano del 2017.
- La última conclusión es que el agua del humedal, una vez se reduzca la turbidez, es apta para poder reutilizarse con objetivos de irrigación y limpieza.

5. DIAGNÓSTICO HIDROLÓGICO

5.1 INTRODUCCIÓN

Una vez que se demuestra que la calidad del agua del estanque y humedal es apta para la reutilización en irrigación y limpieza, se dispone a realizar un modelo teórico a partir del *software EPA SWMM 5.1* para modelar la respuesta de la cuenca ante los episodios de lluvia.

En el Anejo 4 se detallan las bases de cálculo, metodología y datos empleados en la modelación que en este apartado se comentan. Para la modelación se opta por el análisis continuo de los datos de precipitación. Esto permite establecer las actuaciones necesarias para poder aumentar la cuenca drenante y por tanto gestionar una mayor cantidad de agua superficial a partir de estos sistemas de drenaje sostenibles.

5.2 MODELO DE ESTUDIO

5.2.1 Marco teórico

Como ya se ha comentado, el software utilizado para la modelización de la cuenca es el *EPA SWMM 5.1*, siendo este un modelo de simulación basado en fenómenos físicos, que utiliza una solución discreta en el tiempo del fenómeno. A continuación se especifican los métodos empleados por dicho software para modelar la cantidad de escorrentía producida por los episodios de lluvia (Grupo Multidisciplinar de Modelación de Fluido).

5.2.1.1 Escorrentía superficial

Para representar de forma conceptual el fenómeno de la escorrentía, cada una de las cuencas se trata como un depósito no lineal, en la que los aportes provienen tanto de precipitación (lluvia y nieve) como de otras cuencas aguas arriba. Los caudales de salida se producen por procesos como la infiltración, la evaporación y la escorrentía superficial. A su vez, cada depósito tiene un valor máximo de almacenamiento, denominado parámetro de almacenamiento en depresión (dp). Este corresponde a la inundación del terreno, el mojado superficial de la superficie del suelo y los caudales interceptados en la escorrentía superficial por las irregularidades del terreno. Por lo tanto, la escorrentía superficial por unidad de área (Q), se produce cuando la profundidad de agua excede el valor de dicho parámetro, calculando el caudal de salida por la aplicación de la fórmula de Manning. La profundidad o calado de agua en la cuenca se utiliza continuamente en cada uno de los instantes de cálculo mediante la resolución numérica del balance de caudales de la cuenca.

5.2.1.2 Comportamiento hidráulico del sistema

El transporte de agua por el interior de cualquiera de los conductos representados en SWMM está gobernado por las ecuaciones de conservación de la masa y de la cantidad de movimiento. Para el presente estudio se utiliza el modelo de la onda dinámica, el cual resuelve las ecuaciones completas unidimensionales de Saint Venant.

5.2.2 Datos de partida

5.2.2.1 Lluvia

Para el estudio de precipitaciones se emplean series históricas (2000-2016) cinco-minutales de precipitaciones. Estos datos fueron proporcionados por la propia Universidad de Lund, la cual dispone de una estación meteorológica automática que permite registrar el nivel de precipitación cada 5 minutos. Además esta estación se encuentra a escasos metros de la cuenca de estudio, tal y como se muestra en la *figura 5.1*



Figura 5.1: Localización de la estación meteorológica automática perteneciente a la Universidad

Debido a la cercanía de la misma, a que se disponen de los datos de lluvia cinco-minutales desde el 1 de enero del 2000, hasta el 1 de enero del 2016, y a que las dimensiones de la cuenca son reducidas (menores de 1km²), solo se utilizan los valores de lluvia proporcionados por esta estación meteorológica, considerándose estos representativos. En la *tabla 5.1* se muestra la localización y características de esta estación meteorológica.

Descripción	Pluviómetro en Lund			
Municipio	Lund			
Región	Skåne County			
Coordenadas	Uso	E (m)	N (m)	m.s.n.m
	33	387168.52	6175505.42	66

Tabla 5.1: Coordenadas de la estación meteorológica automática perteneciente a la Universidad de Lund

5.2.2.2 Datos climáticos

Los restantes datos climáticos se obtienen a través de la aplicación web del SMHI (“Sveriges Meteorologiska Och Hydrologiska Institut”). Esta aplicación web permite obtener datos de una serie de estaciones meteorológicas repartidas por toda Suecia.

Los datos climáticos requeridos por el modelo para el cálculo de la caída de nieve, deshielo o para el cálculo de la evaporación son: temperatura mínima y máxima, radiación solar, velocidad del viento y humedad relativa. Los dos primeros se obtienen de una estación meteorológica situada en la propia ciudad de Lund. Sin embargo, los datos de velocidad y humedad relativa provienen de una estación meteorológica situada en la ciudad de Malmö, a unos 10 km de la cuenca de estudio. Como no se dispone de otra fuente de datos, y la distancia entre la cuenca de estudio y dicha estación no es excesiva, se adopta esta fuente de datos para los cálculos.

5.2.2.3 Disposición y características de los elementos de drenaje

La información acerca de los elementos de drenaje de la cuenca es suministrada por Akademiska Hus, empresa encargada del mantenimiento de la Universidad. La disposición de las tuberías, imbornales y colectores se representan en el Plano 7.

5.2.2.4 Modelo de elevación digital (DEM)

Este modelo, proporcionado por el centro de sistemas de información geográfica (GIS center) de la Universidad de Lund, se utilizó para delimitar la cuenca y las subcuencas, las pendientes medias de cada una de ellas y determinar las líneas topográficas, representadas en el Plano 3. Dichos datos se pueden obtener a partir del *software ArcMap*, con el cual es posible el cálculo de los parámetros y características de la cuenca.

5.2.3 Elementos físicos del modelo

5.2.3.1 Subcuencas

Las cuencas son las unidades hidrológicas de terreno cuya topografía y elementos del sistema de drenaje conducen la escorrentía directamente hacia el punto de desagüe. En este estudio las subcuencas se dividen en áreas que permiten el estudio detallado de la cuenca, determinando los puntos de drenaje en las alcantarillas e imbornales del sistema de tuberías principales de la red. Tanto los puntos de drenaje como las distintas subcuencas se especifican en el Plano 6 y en la *figura 5.2*.

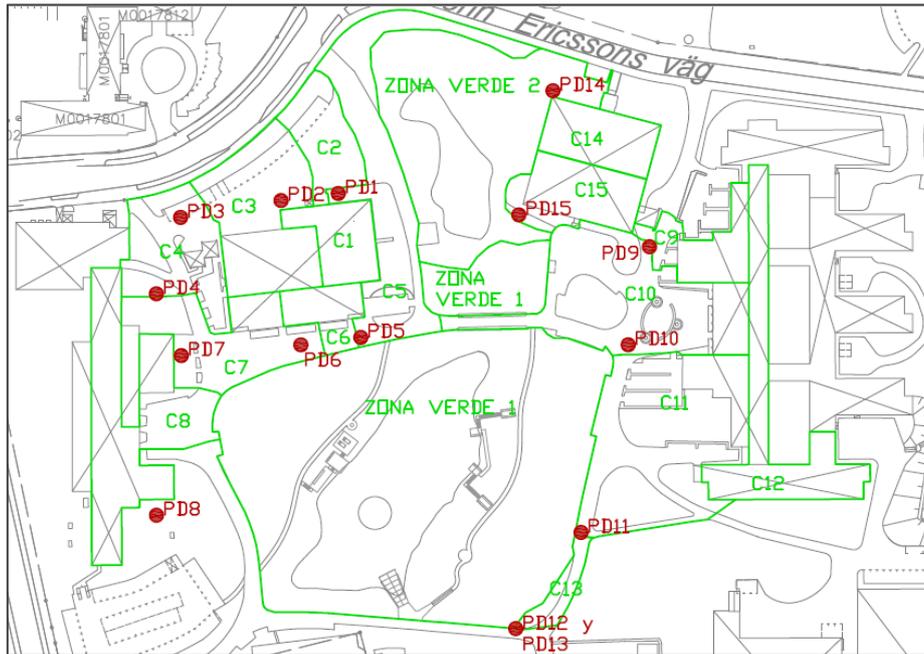


Figura 5.2: Delimitación de las subcuencas y puntos de desagüe de cada una de ellas

Se observa como la subcuencas C14, C15 y zona verde 2 desaguan al estanque. A su vez, cuando en este se alcanza una determinada cota de agua esta desemboca en el humedal a través de un cauce natural, que pasa por debajo de una pasarela y cruza una de las partes de la zona verde 1, tal y como se muestra en la imagen 5.1



Imagen 5.1: Fotografías que muestran el cauce por donde desagua el estanque tomada desde la zona verde 2 (fotografía de la izquierda), y desde la pasarela (fotografía de la derecha)

Tal y como se indica en el Anejo 2, donde se describen las características de la zona de estudio, cada una de estas subcuencas dispone de un área, permeabilidad y pendiente distintas. Todos estos datos necesarios para definir el modelo se especifican en el Anejo 4. A forma de resumen se recogen los valores de los parámetros requeridos para en análisis del comportamiento de la cuenca en la tabla 5.2:

Subcuenca	Área m ²	Tasa de impermeabilidad (%)	Pendiente cuenca (%)	Número de Manning		Almacenamiento en depresión (mm)	
				Perm.	Imperm.	Perm.	Imperm.
C1	700.66	100	2	0.15	0.016	5	2
C2	828.66	78.07	4.337	0.15	0.011	5	2
C3	1919.9	87.99	4.58	0.15	0.013	5	2
C4	1403.5	60.41	6.48	0.15	0.011	10	2
C5	2342.58	48.52	7.94	0.15	0.011	15	2
C6	523.93	94.73	3.28	0.15	0.015	5	2
C7	1816.32	79.04	3.40	0.15	0.013	5	2
C8	2375.39	96.07	2.37	0.15	0.014	5	2
C9	765.89	95.72	2.19	0.15	0.015	3	2
C10	2814.99	75.87	5.98	0.15	0.012	3	2
C11	3279.85	57.67	4.19	0.15	0.012	5	2
c12	1627.30	100	2	0.15	0.016	3	2
C13	286.12	0	11.16	0.15	-	10	-
C14	828.79	100	2	0.15	0.016	5	2
c15	1058.82	79.45	5.08	0.15	0.016	5	2
Zona Verde 1	10556	0	23.27	0.15	-	5	-
Zona Verde 2	3472	0	21.84	0.15	-	5	-

Tabla 5.2: Características de las subcuencas de estudio

5.2.3.2 Conducciones

Las conducciones utilizadas en el sistema de drenaje de la cuenca son tuberías de PVC de diferentes diámetros y pendientes.

En cuanto a la conducción entre el estanque y el humedal, como ya se ha comentado anteriormente, es un cauce natural con una rugosidad elevada debido a los matorrales y cuya sección transversal se representa de forma aproximada en la figura 5.3.

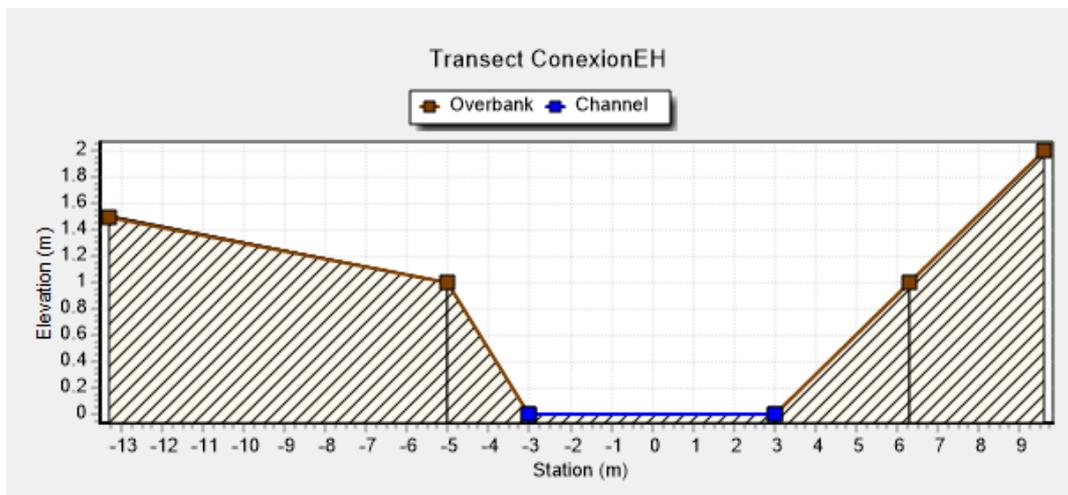


Figura 5.3: Cauce natural que une el estanque con el humedal

5.2.3.3 Nudos de conexión y de desagüe

Los nudos de conexión constituyen los puntos de desagüe de las subcuencas y los puntos de unión de las conducciones.

El nudo de desagüe de la cuenca se encuentra en el humedal. A la hora de la modelación, se opta por modelar una longitud de tubería de 100 metros hasta llegar al punto de vertido para que el caudal de salida no se vea afectado por las condiciones de contorno de desagüe. Además debido a que el agua del humedal desagua al sistema de drenaje pluvial de la ciudad, se ha elegido la condición de contorno en la descarga libre, es decir, el nivel de descarga determinado por el mínimo entre el calado crítico y el calado uniforme del conducto.

5.2.3.4 Sistema de almacenamiento

Para representar los dos cuerpos de agua, se modelan dos sistemas de almacenamiento. Para ello es necesario definir dos curvas de almacenamiento, una para el estanque y otra para el humedal. Esta información se obtiene gracias al *software ArcMap*, el cual dispone de una herramienta que calcula el área y volumen bajo un plano con una cota concreta. A continuación se representan las dos curvas de almacenamiento:

ESTANQUE		HUMEDAL	
Profundidad (m)	Área (m ²)	Profundidad (m)	Área (m ²)
0	681.5	0	0
1	876.7	1	182.9
2	1464.3	1.5	2550.3
3	2319.7	2	2914.
4	3293.4	2.5	2319.7
5	4428.8	3	3293.4
		3.5	4428.8
		4	4358.6
		4.5	4619.1
		5	4884.9
		5.5	5194.9

Tabla 5.4: Curvas de almacenamiento del estanque y el humedal

El máximo almacenamiento para el estanque, es decir, la cota a partir de la que se comienzan a inundar zonas aledañas, es a la cota 66.5, correspondiente a la profundidad de 3.5 metros. En cuanto al humedal, la máxima cota que alcanza sin inundar zonas aledañas es a la cota 61 metros, correspondiente a la profundidad de 5 metros.

5.2.4 Otros elementos del modelo

5.2.4.1 Evaporación

La evaporación en el modelo se puede dar para aguas estancadas en las superficies de las cuencas, las aguas subterráneas en los acuíferos y para el agua acumulada en las unidades de

almacenamiento. Debido a que este estudio no contempla las aguas subterráneas, ya que los dos cuerpos de agua se encuentran impermeabilizados y por lo tanto no se produce intercambio de agua, se calcula la evaporación en los dos sistemas de almacenamientos y la de las aguas estancadas.

Para ello se utiliza la formulación que propone la FAO, así como el software *ETo Calculator*, con el cual se calcula la Evapotranspiración Potencial de una superficie de referencia, mediante la formulación de la FAO Penman-Monteith (Food and Agriculture Organization of the United Nations (FAO), 2012). A este valor se le aplica un factor para obtener la evaporación en las superficies libres de agua, siendo dicho factor 1.05. Debido a la falta de datos en algunos años (los datos de la radiación solar comienzan en 2008), se opta por realizar las medias mensuales de los años donde se disponen de datos, para calcular la evaporación media mensual.

El proceso de cálculo se especifica en el Anejo 4, siendo los valores de evaporación introducidos en el modelo los que se especifican en la *tabla 5.5*

Mes	Evaporación (mm/día)
Enero	0.33
Febrero	0.53
Marzo	1.09
Abril	2.36
Mayo	3.36
Junio	3.83
Julio	4.06
Agosto	3.12
Septiembre	1.93
Octubre	0.86
Noviembre	0.41
Diciembre	0.30

Tabla 5.5: Evaporación media mensual

5.2.4.2 Nieve

Debido a que este proyecto se lleva a cabo en Suecia, país caracterizado por sus bajas temperaturas, no se desprecia la modelación de la nieve. Por lo tanto, se modela la precipitación que se produce en las subcuencas, y que proviene de la capa atmosférica, en forma de lluvia o nieve. Para describir el comportamiento de la cuenca ante la precipitación en forma de nieve, en primer lugar, cada cuenca se subdivide en diferentes zonas: permeable, impermeable y zona impermeable en la que se puede retirar la nieve (surcos).

Debido a que en las cuencas de las zonas verdes no existe retirada de nieve, se crean dos tipos de modelos de nieve que se asignan, uno a las subcuencas que solo disponen de área permeable y otro para el resto de subcuencas.

Los parámetros necesarios para modelar este proceso, se especifican también en el Anejo 4, y se resumen en la *tabla 5.6*.

Tipo de superficie	Surcos	Impermeable	Permeable
Coef. Min desh (mm/hr/deg C)	5	5	5
Coef. Max desh (mm/hr/deg C)	8	8	8
Temperatura base (deg C)	0.5	0.5	0.5
Capacidad para agua líquida	0.2	0.2	0.2
Espesor inicial de nieve (mm)	0	0	0
Espesor inicial de agua (mm)	0	0	0
Nivel para el 100% de cubierta (mm)		5	5

Fracción de área impermeable con quitanieves	
Zonas verdes	0
Resto de subcuencas	0.15

Tabla 5.6: Parámetros necesarios para modelar los objetos de nieve

El *software EPA SMWW 5.1*, también permite describir como se produce la retirada de nieve en el área cubierta que admite el uso de máquinas quitanieves. Atendiendo a la información proporcionada por Akademiska Hus (empresa de mantenimiento), se descubre que el espesor para comenzar la retirada de nieve, es decir, el espesor mínimo para la utilización de las máquinas quitanieves y la retirada manual de nieve es de aproximadamente de 20 mm. Además, confirmaron que la nieve se aparta de las zonas de transito de bicicletas y de los aparcamientos, hacia los extremos de los carriles bicis y calles.

Por último, en el módulo climático del software también son requeridos ciertos parámetros con los cuales se calcula el deshielo de la nieve, representados a continuación y cuyos valores son los recomendados por un estudio realizado en el sur de Finlandia (Tikkanen, 2013):

- Temperatura del aire a partir de la cual las precipitaciones se producen en forma de nieve, siendo el valor adoptado de 2°C.
- Propiedades de intercambio de calor de la superficie de nieve. Este valor se representa a partir de dos coeficientes. EL primero el ATI weight (fraction), con valor de 0.5 y el segundo el Negative Melt Ratio (fraction), con valor de 0.6.
- Elevación del área de estudio (65 m), latitud (55.71) y corrección de longitud (0).

5.2.4.3 Infiltración

Para la modelación del fenómeno de infiltración de agua en los suelos no saturados de las áreas permeables de la cuenca se escoge el método del número de curva. Este método es una aproximación adoptada a partir del denominado número de curva del NRCS (SCS) para estimar la escorrentía. En él se asume que la capacidad total de infiltración del suelo puede encontrarse

en una tabla de números de curva tabulados. Los parámetros de entrada para este método son el número de curva, y el tiempo que tarda el suelo completamente saturado en secarse.

En el caso de estudio se encuentra suelo de tipo C, tal y como se demuestra en el Apéndice 1, donde el número de curva para las zonas verdes se establece en 74. Por otro lado para las zonas impermeables el manual de SWMM recomienda un número de curva de 98. Como en cada subcuenca se encuentran tanto zonas permeables como impermeables se ha realizado una media ponderada en función del área que ocupa cada tipo de zona, obteniendo los siguientes números de curvas.

Subcuenca	Número de Curva
C1	98
C2	93
C3	95
C4	88
C5	86
C6	97
C7	93
C8	97
C9	97
C10	92
C11	88
C12	98
C13	74
C14	98
C15	93
Zona Verde 1	74
Zona Verde 2	74

Tabla 5.7: CN para las diferentes subcuencas

En cuanto al tiempo de secado, se adopta un valor de 5 días (Grupo Multidisciplinar de Modelación de Fluido).

5.3 RESULTADOS

5.3.1 Introducción

Una vez introducidos todos los parámetros requeridos para la modelización de la cuenca de estudio se lleva a cabo una simulación continua utilizando el registro de lluvia histórico cincominutal, con un intervalo de cálculo de 5 minutos.

Para poder analizar y sacar conclusiones de la gran cantidad de datos obtenidos, debido al análisis continuo, se propone analizar las probabilidades de no excedencia de los volúmenes de los dos cuerpos de agua, así como comprobar si los volúmenes máximos son sobrepasados. En

los Apéndices 2 y 3 se muestran las características de los eventos y los volúmenes de almacenamiento en los cuerpos de agua tras realizar la primera simulación respectivamente.

Para establecer el número de eventos de precipitación que ocurren en estos 16 años de datos históricos, se estipula un tiempo entre eventos de 11 horas. El cálculo de este valor se detalla en el Anejo 4.

5.3.2 Número de eventos y características de los mismos

Para estudiar los resultados proporcionados por el modelo, se procede al estudio de balance volumétrico a lo largo de la serie histórica de 16 años. Aplicando el tiempo entre eventos de 11 horas, se obtienen 1898 eventos, lo que hacen 118.6 eventos de precipitación (lluvia y nieve) por año. De este modo se extrae la cantidad de agua precipitada que se convierte en escorrentía superficial y se almacena en los dos cuerpos de agua, para luego asociar una probabilidad de ocurrencia a cada evento.

Como se ha comentado anteriormente, el intervalo de cálculo se establece en 5 minutos por motivos computacionales, con un error de continuidad de 0.039%, siendo este valor aceptable.

En cuanto a la pauta de comportamiento del sistema, se puede observar como una proporción muy elevada de la precipitación se convierte en escorrentía superficial, con baja infiltración (debido al tipo de suelo), y prácticamente nula evaporación y almacenamiento en superficie (debido a las grandes pendientes de la cuenca).

Evaporación	Infiltración	Escorrentía	Almacenamiento en superficie
4192.238	15059.696	340782.282	3.816
1.16%	4.1828%	94.6517%	0.0011%

Tabla 5.8: Balance volumétrico (mm) en la serie histórica (2000-20016)

En la siguiente gráfica se representa el volumen en m³ de escorrentía generado por cada evento de lluvia a lo largo de la serie histórica.

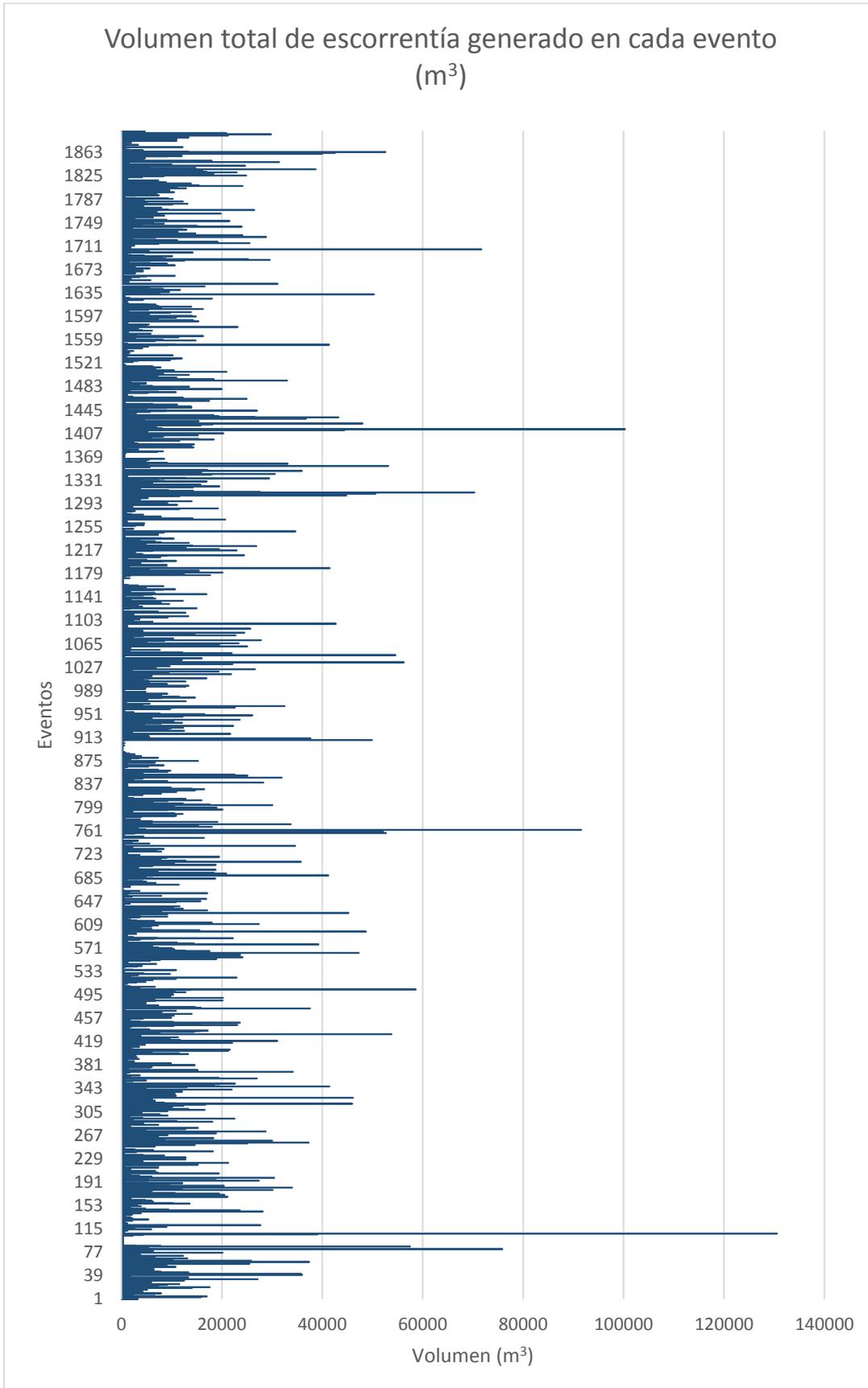


Figura 5.4: Volumen de escorrentía generado en cada evento

Se comprueba cómo los 4 eventos que mayor escorrentía produce están asociados a eventos con precipitaciones de largas duraciones (mayores a 24 horas). Durante estos eventos, también se comprueba como ambos, estanque y humedal, son capaces de evacuar dichos volúmenes, no superando sus volúmenes de almacenamiento máximos. La media de volumen de escorrentía en los eventos es de 2760 m3 por evento. Los dos cuerpos de agua disponen de capacidad suficiente como para almacenar y evacuar estos volúmenes sin problema.

5.3.3 Probabilidad de excedencia de los volúmenes del humedal y estanque

A continuación se representa la probabilidad de no excedencia de la serie histórica de volúmenes del humedal y estanque en los 1898 eventos de precipitación.

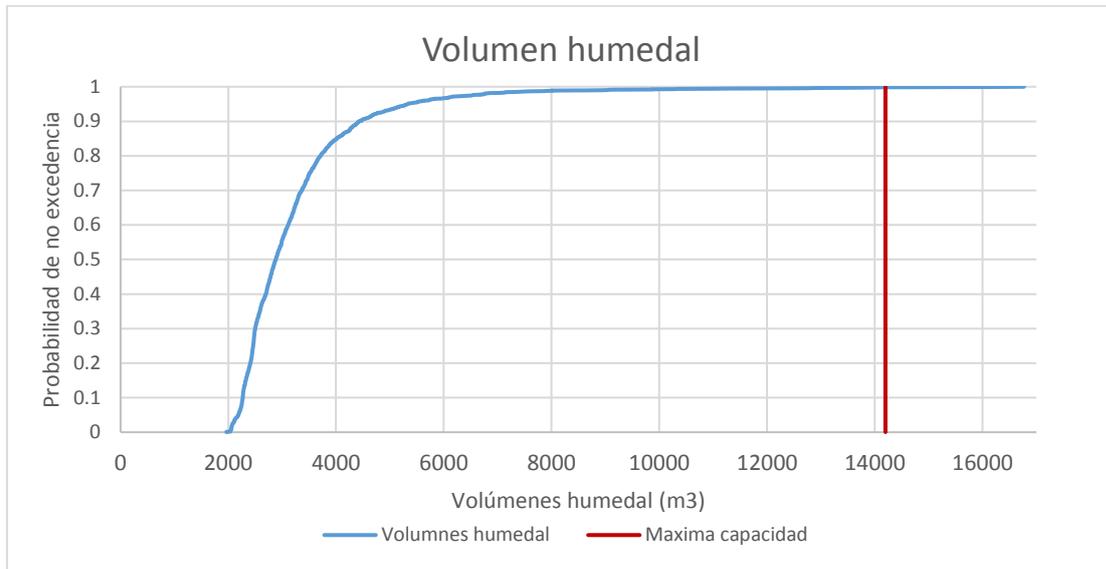


Figura 5.5: Probabilidad de no excedencia de los volúmenes del humedal

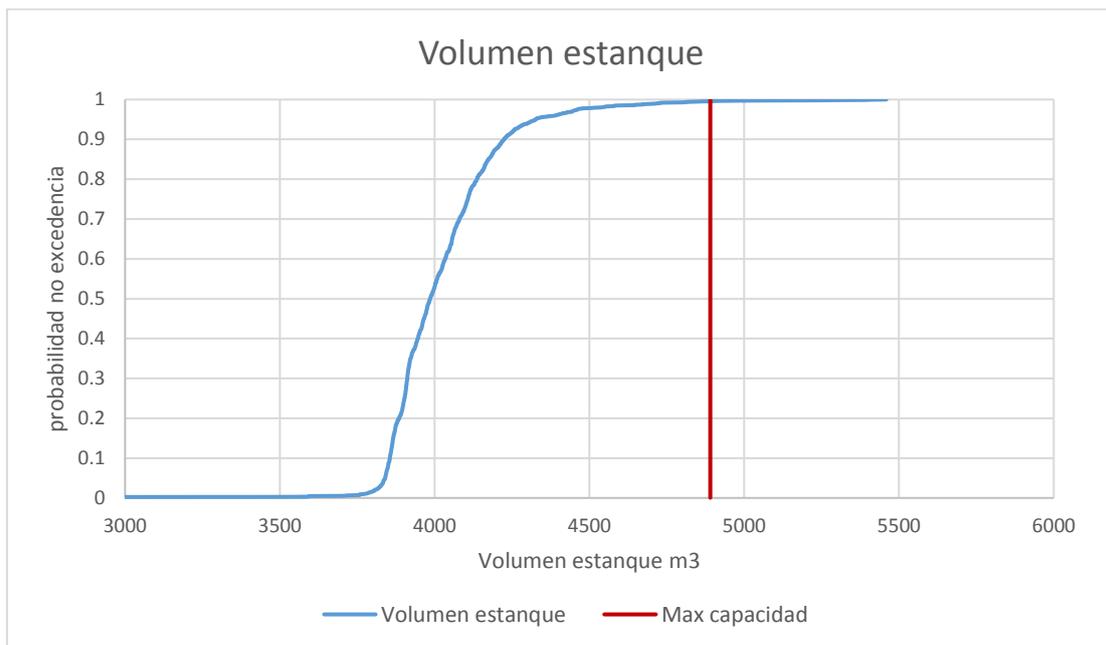


Figura 5.: Probabilidad de no excedencia de los volúmenes estanque.

La probabilidad de no excedencia del humedal es del 98.7% y la del estanque es de 98%. Esto es debido a que la capacidad máxima de almacenamiento del humedal (14198 m³) se supera en tres eventos durante los 16 años de análisis. En cuanto al estanque, su máxima capacidad (4980 m³) se excede en 9 eventos.

Tal y como se muestra en el anejo 4, las lluvias que producen las inundaciones en las zonas aledañas al humedal son lluvias de larga duración con intensidades medias bastantes elevadas, correspondientes a lluvias torrenciales de larga duración (Agencia Estatal de Meteorología, 2015). En cuanto al estanque, el tipo de lluvias que producen estas inundaciones son lluvias veraniegas de relativamente corta duración en la mayoría de casos, y de intensidades medias elevadas. Dos de las tres lluvias que producen el exceso de la máxima capacidad de almacenamiento en el humedal, también originan inundaciones en las zonas aledañas al estanque.

5.3.4 Desagüe del estanque y el humedal

Como ya se ha comentado, el estanque desagua el exceso de agua por un cauce natural que desemboca en el humedal. La cota de solera de este cauce es de 66 metros, es decir, la profundidad de agua en el estanque tiene que ser de 3 metros para que el agua comience a desaguar hacia el humedal. El máximo caudal desaguado corresponde al asociado a la lluvia del 6 de agosto de 2010, con 2.66 m³/s durante 23.9 horas, siendo el máximo caudal aceptado por este cauce de aproximadamente 7.5 m³/s.

En cuanto al máximo caudal desaguado por en el humedal (1.05 m³/s) corresponde al asociado a la lluvia del 2 de Julio del 2011, misma lluvia que produce el máximo volumen en dicho cuerpo de agua.

5.4 CONCLUSIONES

Una vez estudiados los resultados expuestos anteriormente, se llegan a las siguientes conclusiones:

- Aunque la probabilidad de no excedencia de la máxima capacidad del humedal es de 98.7%, si se decide aumentar la cuenca drenante se debería aumentar la capacidad de almacenamiento de este cuerpo de agua, debido a que la tubería de desagüe no es capaz de evacuar el caudal necesario cuando las lluvias son de gran intensidad y larga duración.
- En cuanto al estanque, su principal problema es la cota a la que se empieza a desaguar el caudal almacenado, ya que la cota de solera del desagüe es de 66 metros y a la cota 66.5 comienza a excederse su capacidad de almacenamiento. Además, los desbordamientos del mismo se producen por lluvias de menor duración que las que producen las inundaciones en el humedal, pero de intensidades pico similar.
- Se comprueba como las lluvias que producen las inundaciones en ambos cuerpos de agua son lluvias entre finales de mayo y mediados de agosto, es decir, lluvias veraniegas consideradas como torrenciales.

- Otro problema que se encuentra es que aunque se disponen de zonas verdes, el terreno no dispone de gran capacidad de infiltración, y debido a las grandes pendientes no se almacena en superficie, produciendo una gran escorrentía en cada evento de lluvia.
- Estudiando los eventos de precipitación se comprueba como la nieve no tiene relevancia, no siendo responsable de ninguna de las inundaciones. Esto tiene sentido, ya que aunque la cuenca de estudio se encuentra en Suecia, Lund es una ciudad bastante al sur del país, en la cual las temperaturas no llegan a ser tan extremas como en la parte norte del país.

6. ANÁLISIS DE LAS ALTERNATIVAS

6.1 INTRODUCCIÓN

En el siguiente apartado se estudian las actuaciones necesarias para reducir la probabilidad de excedencia asociadas a los volúmenes que superan la capacidad de almacenamiento en estanque y humedal. Por otro lado, también se pretende determinar si es posible el aumento de la cuenca drenante, y las actuaciones necesarias para seguir manteniendo unas probabilidades de excedencia aceptables.

6.2 ALTERNATIVAS PARA LA MEJORA DE LA SITUACIÓN ACTUAL

6.2.1 Disminución de la cota de solera del cauce natural

Tal y como se especifica en el Anejo 4, el motivo por el que se supera la capacidad de almacenamiento del estanque es que la cota de solera del cauce natural por el que desagua, es muy elevada. Por ello, durante los episodios de lluvia de altas intensidades medias, dicho cauce no desemboca el caudal necesario para evitar la inundación de las zonas aledañas.

Por este motivo, la primera alternativa que se plantea es la de disminuir dicha cota de solera en diferentes alturas y comprobar cómo afecta este cambio, tanto al estanque, como al humedal, ya que es este último el que recibe el caudal desaguado.

Para ello se un estudio de cómo afecta al funcionamiento de ambos cuerpos de agua diferentes cotas de solera, descritas en la *tabla 6.1*

Alternativa	Excavación (m)	Cota de solera
Alternativa 1 (A1)	1	65
Alternativa 2 (A2)	0.5	65.5
Alternativa 3 (A3)	1.5	64.5

Tabla 6.1: Descripción de las diferentes alternativas para la variación de la cota de solera del cauce natural

Debido a que este cauce se encuentra constituido por matorrales sin ningún valor paisajístico, se plantea el desbroce y replante de una mezcla de césped y *Allium schoenoprasum*, también conocido como cebollino, especies que se desarrollan de forma natural en esta zona del país.

A continuación se representan los resultados obtenidos para las tres alternativas de variación de cota del cauce.

6.2.1.1 Resultados actuaciones A1, A2 y A3 en el estanque

En la *figura 6.1*, se representan los volúmenes del estanque asociados a diferentes probabilidades de excedencia en función de las diferentes cotas de solera del cauce de desagüe, expuestas anteriormente.

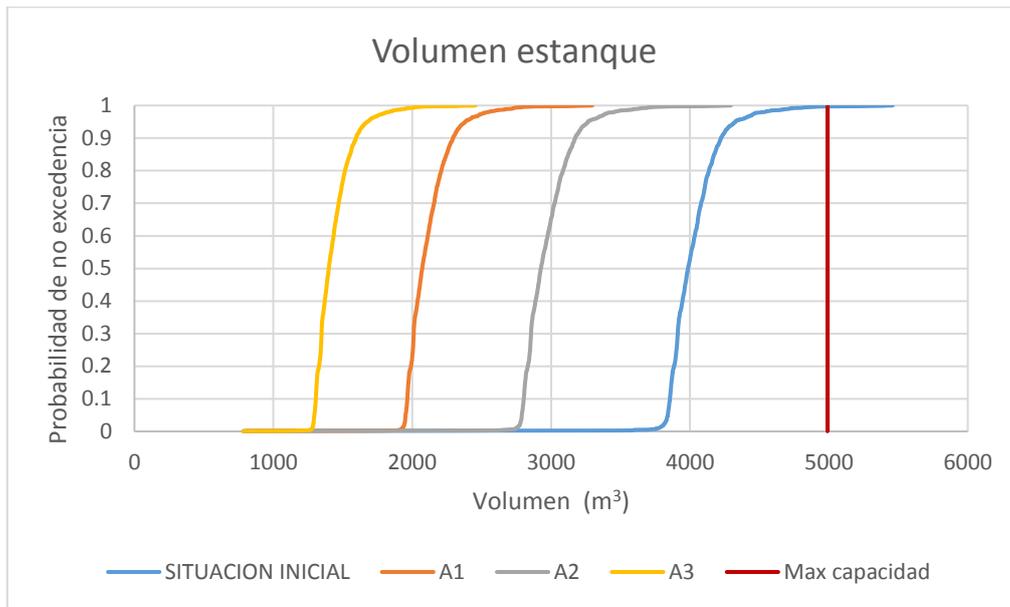


Figura 6.1: Diferentes volúmenes del agua almacenada en el estanque asociada a probabilidades de no excedencia para diferentes alternativas.

Se puede comprobar como con variar la cota de 66 metros a 65.5, es decir, excavar 0.5 metros (alternativa A2), el volumen de almacenamiento máximo del estanque (4294 m³) no alcanza el volumen máximo permitido (4990 m³). Esto indica que con la sección transversal del cauce es más que suficiente para desaguar los caudales requeridos para evitar inundaciones en la zona del estanque.

También se observa como conforme disminuye la cota de solera, los volúmenes máximos que se almacenan en el estanque van disminuyendo, debido a que se desagua un mayor volumen al humedal. Debido a que lo que se pretende es almacenar el máximo volumen de agua posible para, posteriormente, poder reutilizar dicha agua, la alternativa más adecuada sería la Alternativa 2, teniendo en cuenta solo el humedal.

6.2.1.2 Resultados actuaciones A1, A2 y A3 en el humedal

En la *figura 6.2*, se representan los volúmenes del humedal asociados a diferentes probabilidades de excedencia, al igual que en el apartado anterior. En este caso, a diferencia de la variación de volumen en el estanque, el almacenamiento varía respecto de la situación actual debido a que los caudales de avenida que se producen en los eventos de lluvia aumentan. Dicho aumento es debido a que el estanque desagua mayor cantidad de agua al humedal.

Al igual que en el caso anterior, se analiza la respuesta del humedal para las tres alternativas planteadas.

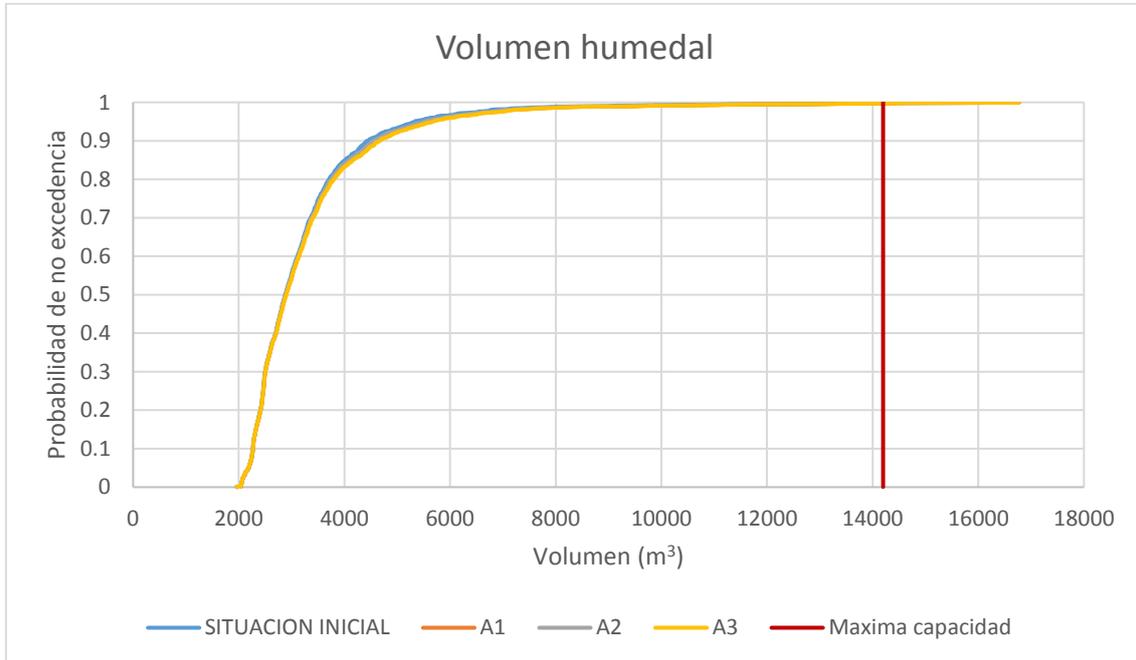


Figura 6.2: Diferentes volúmenes del agua almacenada en el humedal asociada a probabilidades de no excedencia para diferentes alternativas.

Se observa como en este caso, los volúmenes de almacenamiento aumentan para una misma probabilidad de no excedencia, con respecto a la situación inicial. Sin embargo también se observa como esta variación no es demasiado significativa.

En el Anejo 5 se detallan los eventos en los que se superan la máxima capacidad permitida (14198 m^3), observando como en la situación inicial, de los 1898 eventos modelados en 16 años de datos de precipitación, se supera el máximo almacenamiento en 3 eventos y como conforme disminuye la cota de solera del cauce, el volumen para el mismo evento aumenta.

Por ello, debido a que con la disminución de 0.5 metros de cota, el estanque ya no sufre problema de inundaciones en los 16 años de estudio y que es la alternativa menos desfavorable para el humedal, se escoge la Alternativa A2 como la más adecuada.

6.2.2 Aumento de la cota máxima del humedal

Una vez solucionado el problema de inundación en las zonas aledañas al estanque, se propone el aumento de la mínima cota del humedal, la cual se encuentra al sur del mismo, aumentando con esta medida la capacidad de almacenamiento.

Por ello se presenta la alternativa A4 con la que se aumenta la cota de la zona señalada en la figura 6.3.

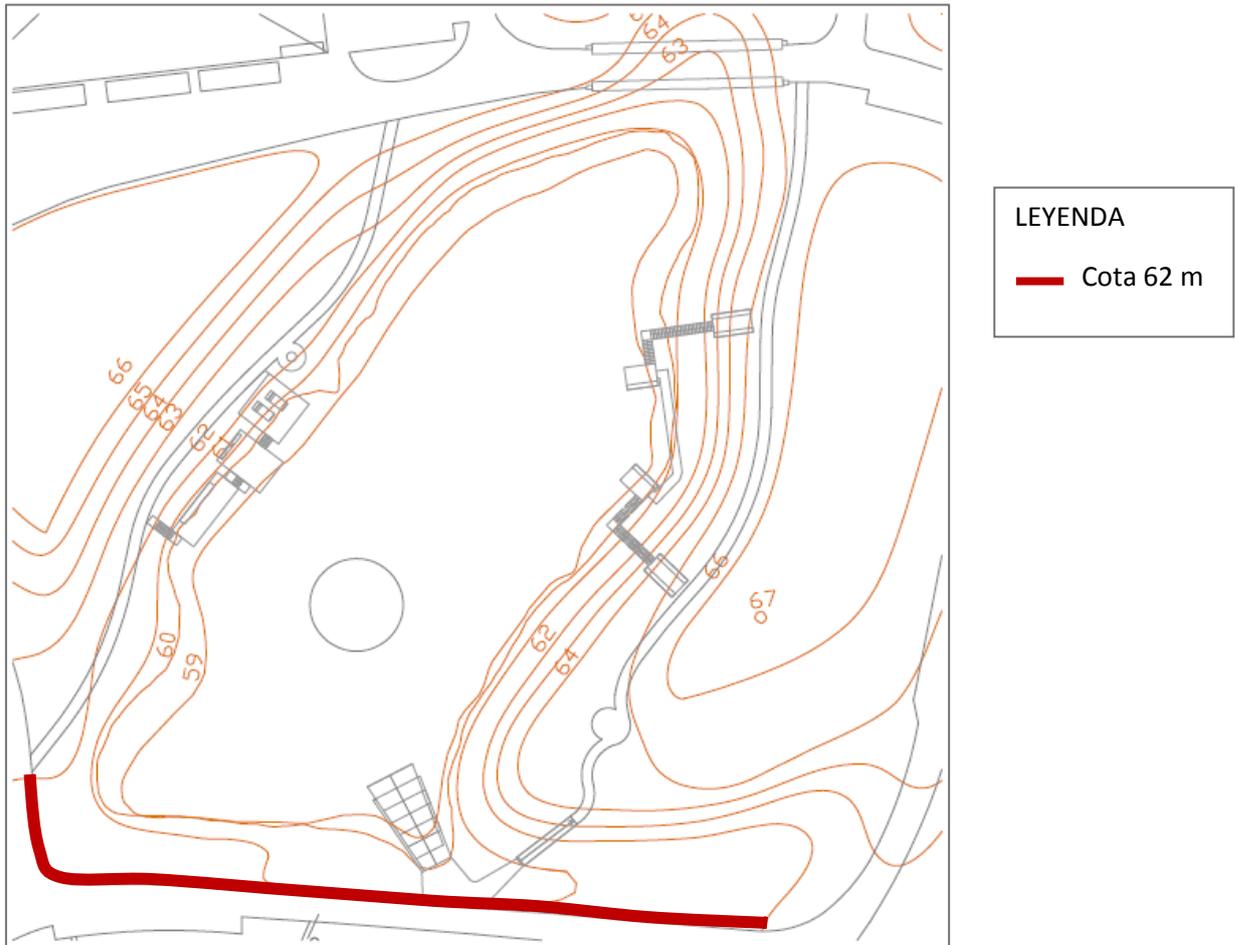


Figura 6.3: Aumento de la cota del terreno a 62 metros

Al aumentar la capacidad de almacenamiento del humedal es necesario variar la curva de almacenamiento introducida en el *software* EPA SWMM 5.1, añadiendo por tanto el área a la cota 62, la cual es 5754 m². A esta cota, el volumen de almacenamiento máximo pasa a ser 19236 m³.

Una vez introducidos los cambios propuestos por esta alternativa A4 de aumento de la capacidad de almacenamiento máxima, se estudia cómo afecta en los volúmenes de almacenamiento del humedal. Para ello se representan los valores de dichos volúmenes en función de sus probabilidades de no excedencia en la *figura* 6.4.

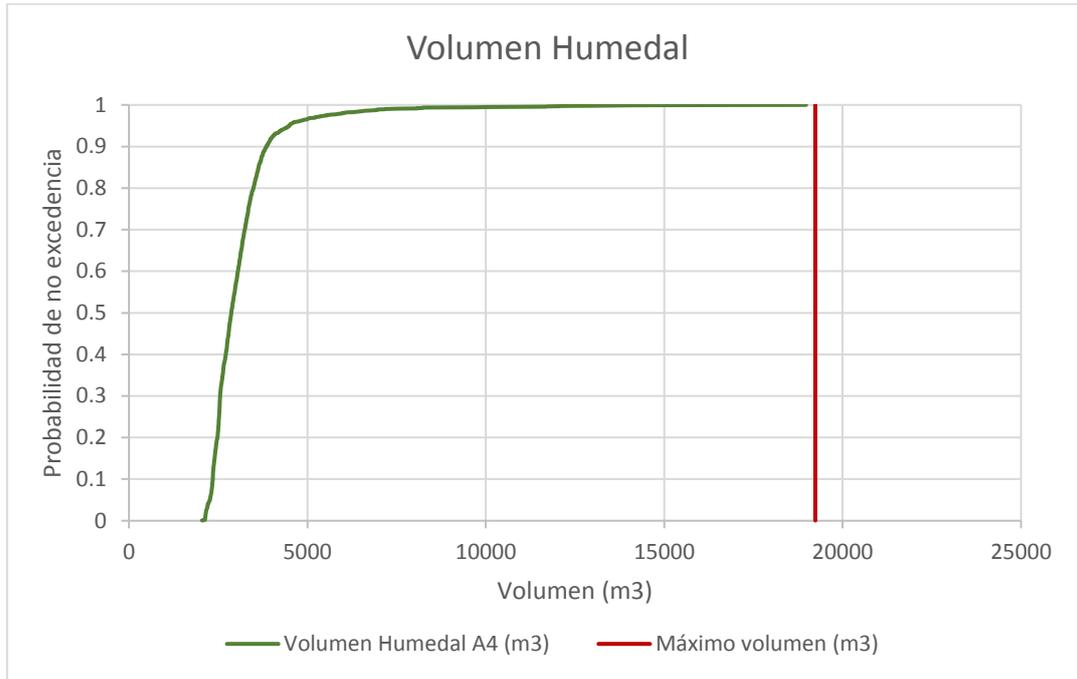


Figura 6.4: Diferentes volúmenes del agua almacenada en el humedal asociada a probabilidades de no excedencia para la alternativa A4.

Se observa como el máximo almacenamiento (18974 m³) no sobrepasa el máximo volumen permitido a la cota 62 (19236 m³).

Mediante esta alternativa se comprueba como a la cota 62 el humedal no experimenta ninguna inundación, tal y como muestra la figura 6.5 obtenida del software EPA SWMM 5.1, donde se representa el caudal que sobrepasa la capacidad de almacenamiento (eje Y) y el volumen de almacenamiento (eje X).

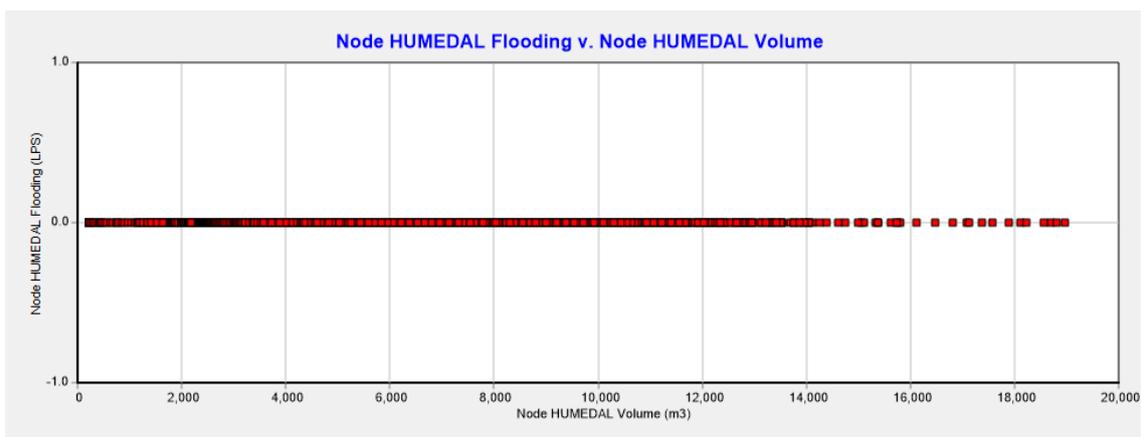


Figura 6.5: Representación caudal desbordado (l/s) vs volumen del humedal (m³) en el humedal.

Teniendo en cuenta la dirección del flujo y la delimitación de los usos del suelo, representados en la *figura 6.7* y en el Plano 8, se delimitan las zonas de la nueva cuenca que se añade al modelo.

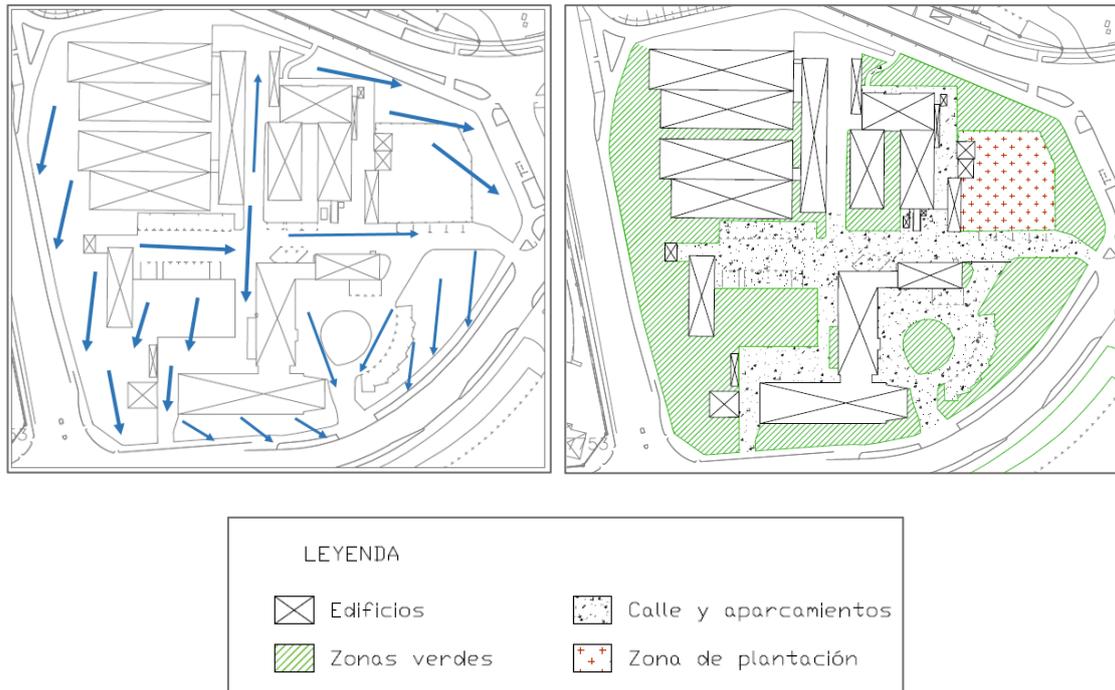


Figura 6.7: Elementos que conforman la nueva zona de la cuenca hidrográfica.

Esta nueva parcela, cuyas características se especifican en el Anejo 5, se introduce en el *software EPA SWMM 5.1* como una subcuenca que desagua en el estanque, por medio de una tubería, la cual salva el obstáculo de la carretera.

En cuanto a la captación del agua de la escorrentía superficial, se plantea la utilización de una tubería con diámetro de 700 mm, la cual salva el obstáculo de la carretera y dirige el agua hacia el estanque. Los detalles de dicha canalización se especifican en el Anejo 6.

6.3.1.2 Resultados y afección al estanque y humedal

En la *figura 6.8* se observa cómo, aunque los volúmenes de almacenamiento aumentan para las mismas probabilidades de excedencia en comparación con la alternativa A4 (la cual aplica las medidas descrita en apartados anteriores), el aumento de la cuenca drenante no produce que se superen los máximos volúmenes permitidos en el estanque.

Sin embargo, tal y como se observa en la *figura 6.9*, en el humedal si se supera el volumen de almacenamiento máximo en un evento, ya que alcanza el máximo permitido (19598 m³), y provoca inundaciones en las zonas aledañas.

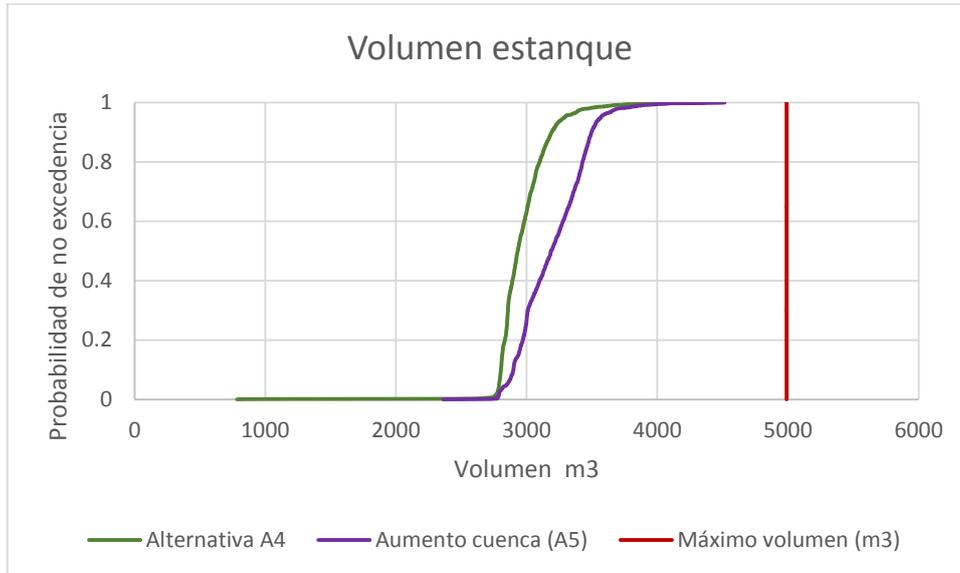


Figura 6.8: Volúmenes en el estanque asociados a probabilidades de no excedencia para las alternativas A4 y A5.

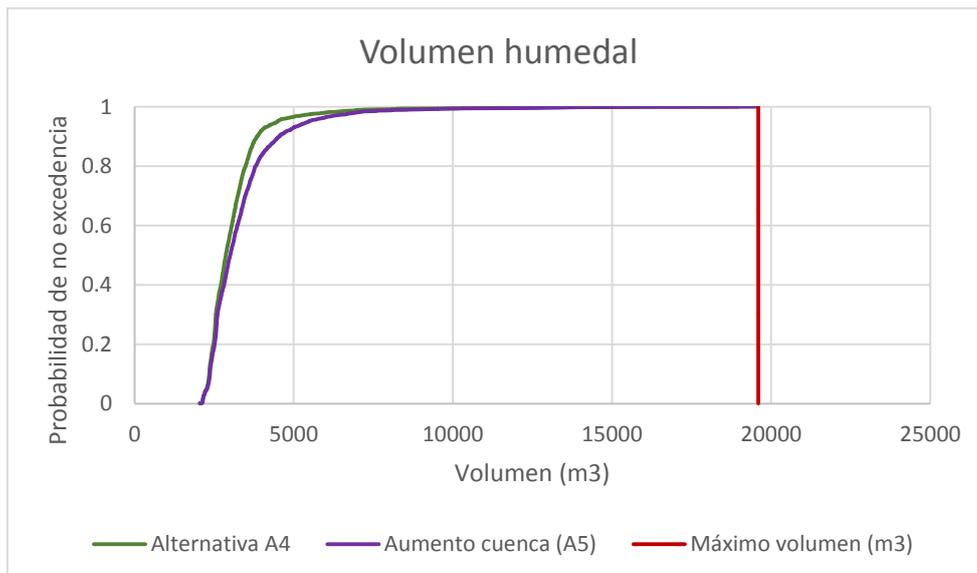


Figura 6.9: Volúmenes en el humedal asociados a probabilidades de no excedencia para las alternativas A4 y A5.

6.3.2 Actuaciones tras el aumento de la cuenca

Se demuestra la necesidad de realizar actuaciones para evitar la inundación de las zonas aledañas al humedal debido al aumento de la cuenca. Por ello, y tras realizar un estudio de volúmenes necesarios en el humedal y la afección de la cota de solera en el cauce entre el estanque y el humedal se presentan las siguientes actuaciones contenidas en la alternativa denominada A6:

- Se observa como la capacidad de almacenamiento en el estanque es superior al máximo volumen almacenado. Por ello, aunque en la alternativa A2 descrita en el apartado 2 de este mismo anejo se propone disminuir la cota de solera del cauce en 0.5 metros con respecto a la situación actual, con la intención de disminuir el volumen de agua que llega al humedal, se propone la disminución de la cota de solera de dicho cauce en 0.3 metros, en vez de los 0.5 propuestos en dicha alternativa anterior. Con ello se consigue un mayor almacenamiento de agua en el estanque, y por lo tanto, la posibilidad de reutilización del agua que en él se almacena.
- Por otra parte también se decide ampliar la capacidad del humedal, ampliando el mismo para las cotas 61, y 62, ocupando un área de aproximadamente 5000 m², y 7000 m² respectivamente.
- Con la intención de captar el agua de la nueva cuenca a través de las zonas verdes, se presenta la posibilidad de construir bordillos los cuales impidan la evacuación de la escorrentía hacia otras cuencas y así recolectar el máximo de agua posible.

En el Plano 9 se representa de forma gráfica dichas soluciones. En los siguientes apartados se representa los resultados obtenidos a partir de la simulación. Además en el Anejo 6 se especifican los detalles de estas actuaciones.

6.3.2.1 Resultados estanque

Aplicando las alternativas A5 (aumento de la cuenca) y A6, se obtienen los resultados expuestos a continuación:

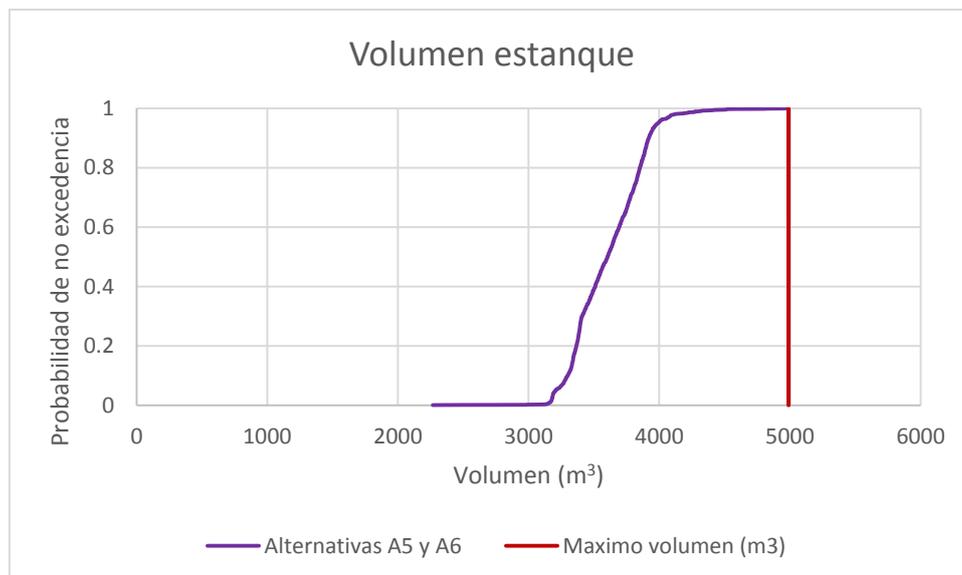


Figura 6.10: Volúmenes en el estanque asociados a probabilidades de no excedencia al aplicar las alternativas A6 y A5.

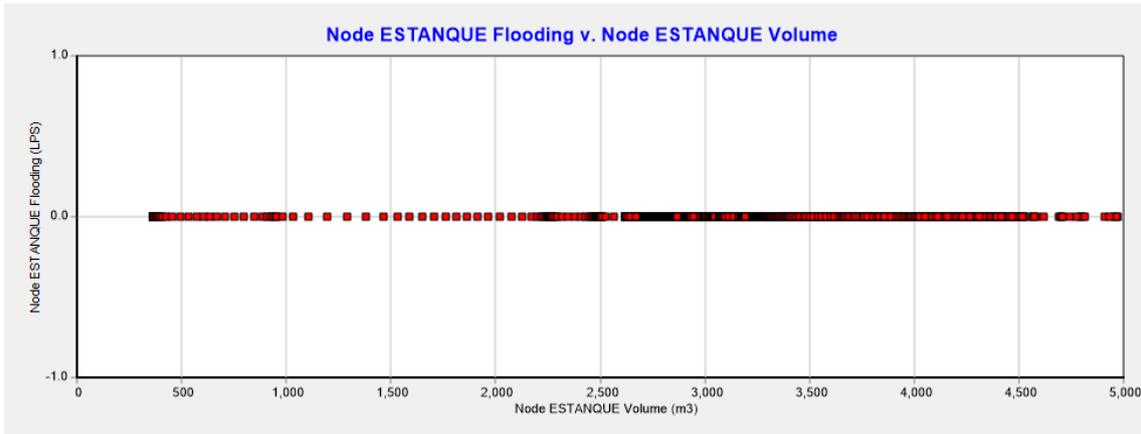


Figura 6.11: Representación caudal desbordado (l/s) vs volumen del estanque (m^3) en el humedal para las alternativas A5 y A6.

Como se puede observar en la figura 6.10, los volúmenes en el estanque aumentan en comparación con alternativas anteriores. Sin embargo, dicho aumento no supera el máximo almacenamiento permitido, ya que el máximo volumen almacenado en los 16 años de estudio, y tras aplicar las alternativas A5 y A6 es de $14970 m^3$.

En la figura 6.11 se observa como no producen inundaciones para los volúmenes almacenados.

6.3.2.2 Resultados Humedal

A continuación se exponen los resultados del análisis al aplicar las alternativas A5 y A6 en el humedal:

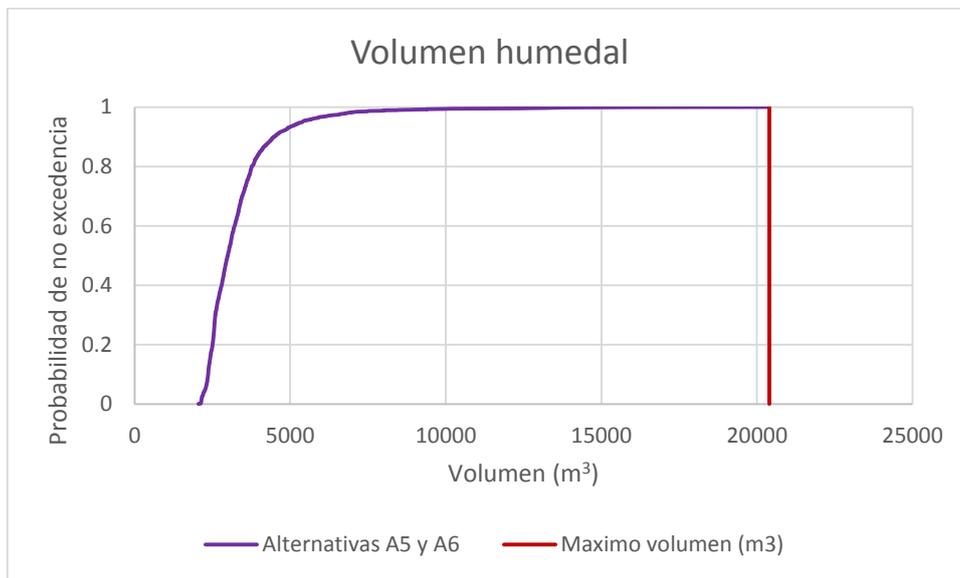


Figura 6.12: Volúmenes en el humedal asociados a probabilidades de no excedencia al aplicar las alternativas A6 y A5.

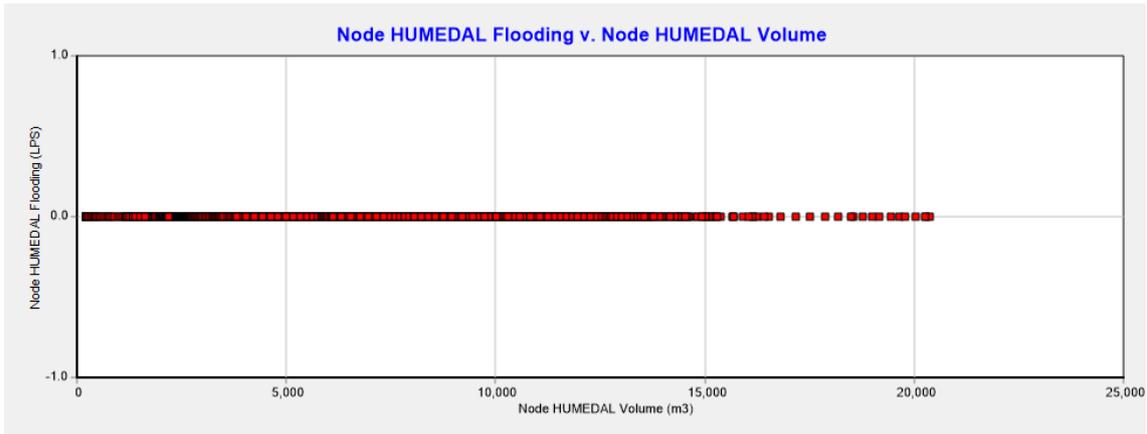


Figura 6.13: Representación caudal desbordado (l/s) vs volumen del humedal (m^3) en el humedal para las alternativas A5 y A6.

En este caso también se observa como no se produce ninguna inundación al no superarse el máximo almacenamiento permitido. En este caso el máximo volumen almacenado es de 20369 m^3 .

Los resultados de esta alternativa final se recogen en el Apéndice 4.

6.4 CONCLUSIONES

Una vez realizados los estudios y análisis descritos en los apartados anteriores se llegan a las siguientes conclusiones:

- Se decide ampliar la cuenca drenante. Sin embargo para ello es necesario realizar una serie de actuaciones, para dirigir el agua de esta nueva subcuenca a los dos cuerpos de agua, y para asegurar que no se produzcan inundaciones, al menos, en un periodo de retorno de 16 años.
- Además, es necesario realizar actuaciones en esta nueva subcuenca para captar el agua de forma superficial a través de las zonas verdes ya existentes y que dicha agua no termine inundando las calles aledañas.
- Para aprovechar al máximo la capacidad de almacenamiento de ambos cuerpos de agua se opta por disminuir la cota de solera del cauce por el que desagua el estanque en 30 centímetros, asegurando con esta medida que no se produzcan inundaciones en el estanque, y disminuyan los volúmenes de agua que terminan en el humedal.
- Por último se plantea la necesidad de aumentar la capacidad de almacenamiento del humedal, para que este pueda albergar una mayor cantidad de agua y así evitar los episodios de inundaciones.

7. PROPUESTA Y DESARROLLO DE LA SOLUCIÓN ADOPTADA

7.1 INTRODUCCIÓN

Tal y como se ha demostrado en el apartado anterior, es posible ampliar la cuenca drenante. Sin embargo, es necesario realizar un estudio para establecer las actuaciones a llevar a cabo para asegurar un buen funcionamiento de los sistemas de drenaje y una protección contra inundaciones aceptables.

A continuación se describe en detalle las actuaciones a realizar para captar el agua en la nueva subcuenca, y las actuaciones para que esto no produzca inundaciones en el humedal y estanque. En los Planos 9, 10 y 11, se detallan de forma gráfica dichas actuaciones.

7.2 ACTUACIONES

7.2.1 Aumento bordillo

Tal y como se muestra en la *figura A6.1*, se construyen bordillos en las zonas representadas en naranja. El motivo de esta actuación es que el flujo, tal y como se muestra en la *figura 6.7*, se dirige hacia los extremos de la parcela, es decir, la dirección del flujo en la parcela va desde el centro de la misma hacia los extremos, dirigiendo el agua hacia otras subcuencas. Con esta medida se pretende captar la máxima cantidad de agua para así poder almacenarla y reutilizarla, y de esta manera disminuir los caudales pico que el colector de la ciudad debe de ser capaz de evacuar.

Por lo tanto mediante la construcción de estos bordillos se retiene el agua en las zonas verdes, consiguiendo dirigirla hacia los imbornales que posteriormente captan dicha agua superficial y la dirigen hacia el estanque, tal y como se describe en apartados posteriores.

Además también se plantea la reducción de las cotas del terreno en 10 cm de la superficie representada en naranja en la *figura 7.1*. De esta manera se consigue recolectar el agua de los aparcamientos y calle adyacente, captando el agua de forma superficial a partir de zonas verdes.

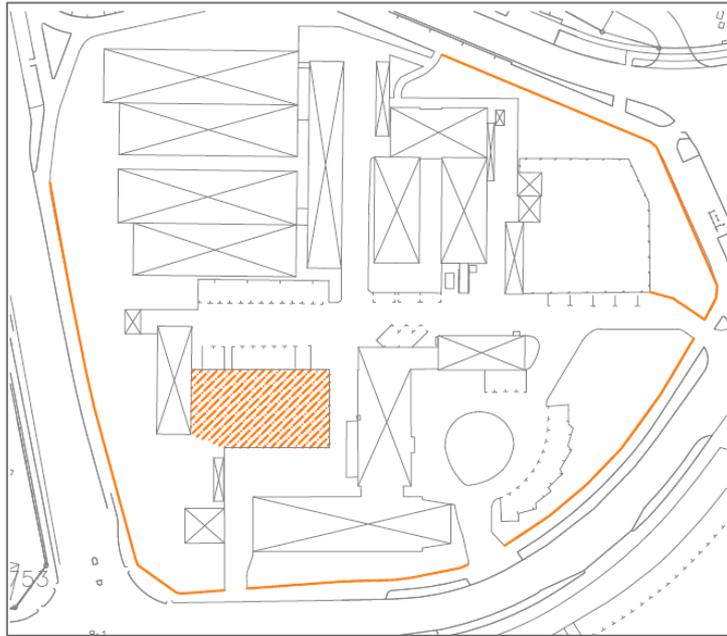


Figura 7.1: Delimitación bordillos y disminución de la cota del terreno para dirigir el agua superficial hacia las zonas verdes de la cuenca

Con ello se consigue que en vez de que el agua de lluvia que llega a las zonas verdes drene a las calles y aparcamientos con superficie impermeable, ocurra lo contrario, que la escorrentía superficial de las zonas impermeables se redirija hacia las zonas verdes y de ahí se capte para llevarla al estanque. Además, con esta medida también se fomenta el riego de las plantas en la zona de plantación de la cuenca.

7.2.2 Rampas de acceso

Con el motivo de captar el agua de la escorrentía superficial en la cuenca, para después poder dirigirla hacia el estanque, se plantea la construcción de rampas de acceso de vehículos a la subcuenca, ya que por estos accesos, tal y como se encuentran diseñados en la actualidad, actuarían como encauzamiento del agua superficial, dirigiéndola hacia los imbornales situados en la calle.

En la *figura 7.2*, se representa en púrpura la localización de las rampas de acceso, las cuales evitan la pérdida de escorrentía superficial, y en la *figura 7.3* los detalles constructivos de estas rampas.

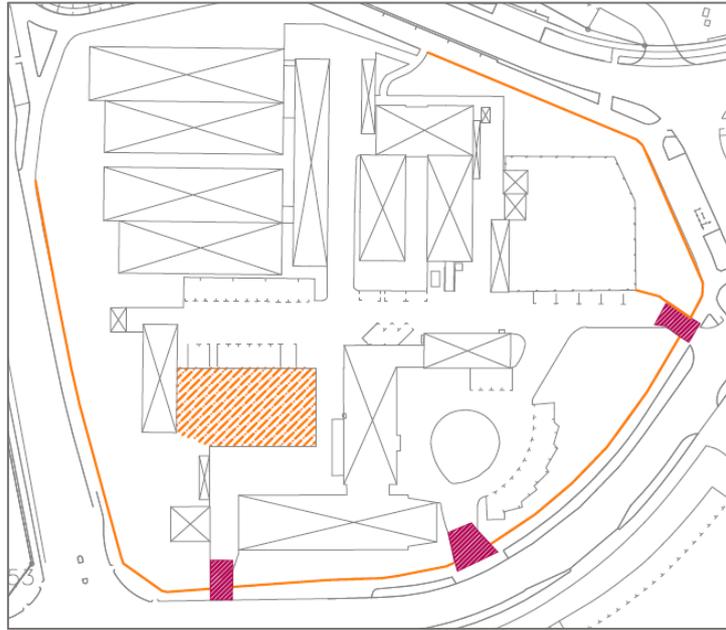


Figura 7.2: Localización de las rampas de acceso

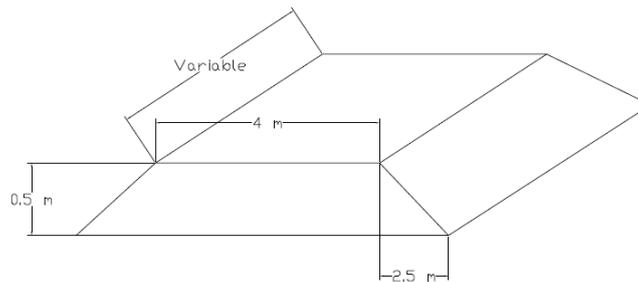


Figura 7.3: Detalles rampa de acceso a la subcuenca

7.2.3 Captación y encauzamiento

7.2.3.1 Estudios previos

Una vez se delimita la nueva subcuenca, se crea la necesidad de captar el agua superficial para que esta desagüe en uno de los dos cuerpos de agua. Además se debe tener en cuenta que entre esta nueva subcuenca y dichos cuerpos de agua existe una carretera.

Por este motivo, tal y como ya se comenta en el apartado 6 de esta misma memoria, se decide modelar un sistema de tuberías las cuales captan el agua en esta cuenca y la dirigen hacia el estanque. Para ello se decide realizar el dimensionamiento de las tuberías a partir del estudio de la respuesta del sistema para una lluvia de diseño, debido a que con el análisis continuo se sobredimensionarían los diámetros.

En primer lugar se tiene en cuenta las recomendaciones de la "Swedish Water and Wastewater Association" (Holmberg, 2005), en cuanto al periodo de retorno de la lluvia de diseño. Para este

caso se recomienda un periodo de retorno mínimo de 10 años. En el Anejo 6 se detallan estas recomendaciones.

Para el diseño del sistema de captación del agua superficial por medio de tuberías se adopta la lluvia de diseño de 15 años de periodo de retorno. Para ello, en primer lugar se delimitan las curvas IDF (Intensidad - Duración - Frecuencia), y posteriormente el hietograma de diseño por el método de los bloques alternos, representados en la *figura 7.4* y la *figura 7.5* respectivamente. En cuanto a la duración de la lluvia se escoge el mayor tiempo entre el tiempo de concentración de la cuenca y los 180 minutos que la “Swedish Water and Wastewater Association”(Jonsson, 2011) recomienda para las lluvias de diseño. En este caso y tras realizar los cálculos pertinentes, se escoge una duración de lluvia de 180 minutos.

La formulación y métodos de cálculo utilizados para la obtención de las curvas IDF, el tiempo de concentración y el hietograma se especifican en el Anejo 6 y en el Apéndice 5, los valores de intensidad para cada espacio de tiempo.

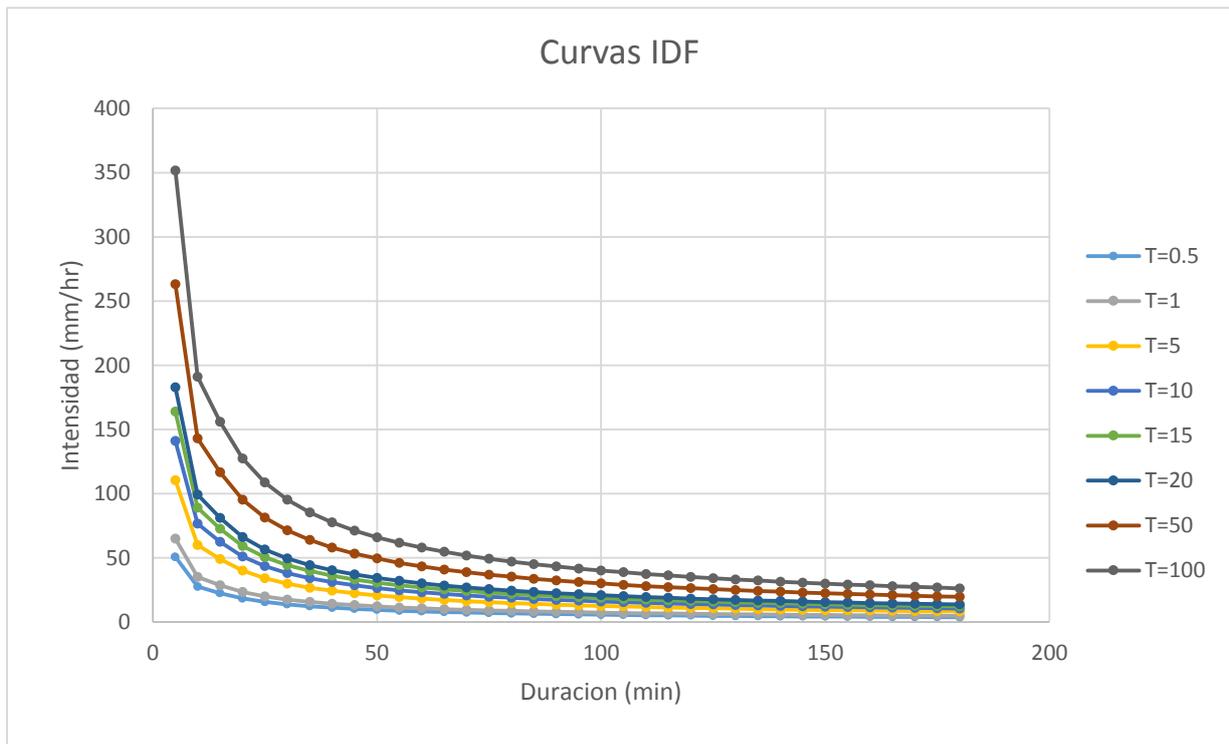


Figura 7.4: Curvas IDF para Lund

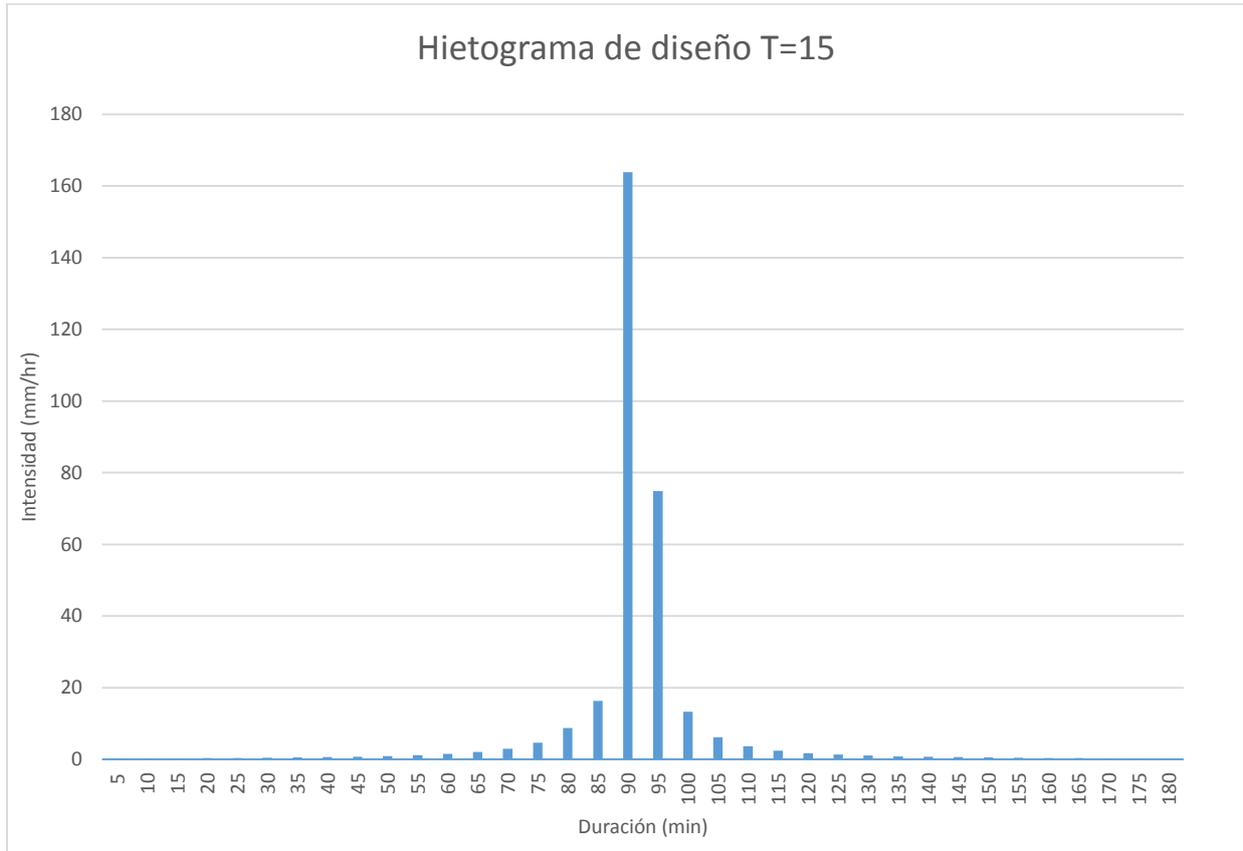


Figura 7.5: Hietograma de diseño para el periodo de retorno de 15 años.

Estos valores se introducen en el *software* EPA SWMM 5.1 para, una vez dimensionado el sistema de tuberías, evaluar su funcionamiento (capacidad hidráulica y velocidades). También se comprueba si para esta lluvia de diseño la capacidad de almacenamiento del estanque y humedal son suficientes para retener la escorrentía generada.

7.2.3.2 Dimensionamiento de las tuberías

A la hora de establecer el diseño de las tuberías, se tiene en cuenta las siguientes restricciones:

- Velocidades en las tuberías mayores a 0.6 m/s, para evitar deposiciones y formación de gases peligrosos.
- Velocidades menores a 3-4 m/s.
- La capacidad máxima hidráulica de alrededor del 80%.
- Cotas del terreno, asegurando que la mínima distancia entre la clave de la tubería y la carretera que atraviesa es de 1 metro.

Con estas restricciones se diseña el sistema representado en la *figura 7.6* con las características especificadas en la *tabla 7.1*.

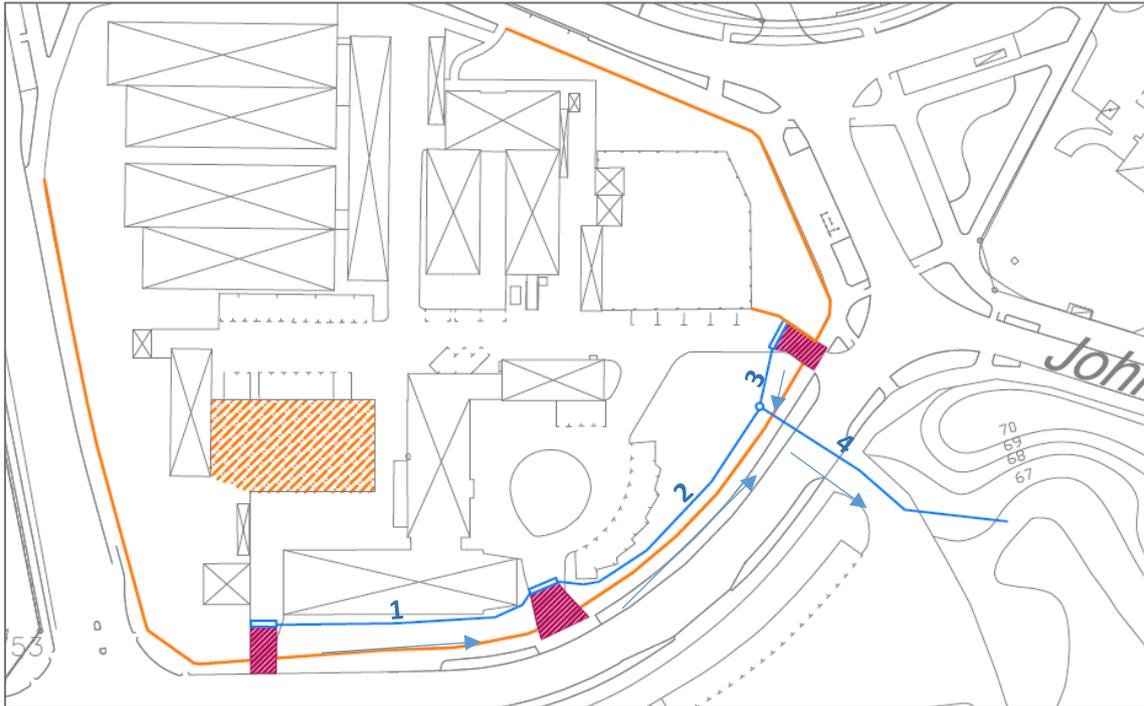


Figura 7.6: Localización en planta del sistema de tuberías de la nueva subcuenca

Tubería	Diámetro (mm)	Longitud (m)	Pendiente (%)	Material
1	300	50	0.2	PVC
2	300	54	0.37	PVC
3	200	10.8	0.46	PVC
4	400	53.8	0.372	PVC

Tabla 7.1: Características tuberías nueva subcuenca

7.2.3.3 Capacidad y velocidades del sistema de tuberías

A partir del análisis del funcionamiento hidráulico mediante el *software* EPA SWMM 5.1, se obtienen los resultados de velocidades y capacidades hidráulicas expuestos a continuación.

- Velocidades

En la *tabla* 7.2 se representan los valores máximos de las velocidades en cada tubería. Se observa como estas velocidades se encuentran en el rango establecido, cumpliendo con las restricciones máximas y mínimas.

Tubería	Velocidades máximas(m/s)
1	0.74
2	1.08
3	0.96
4	1.15

Tabla 7.2: Velocidades máximas (m/s) en cada tubería

- Capacidad hidráulica

La máxima capacidad hidráulica de cada tubería se representa de forma gráfica en las *figuras 7.7 y 7.8* y con los valores representados en la *tabla 7.3*.

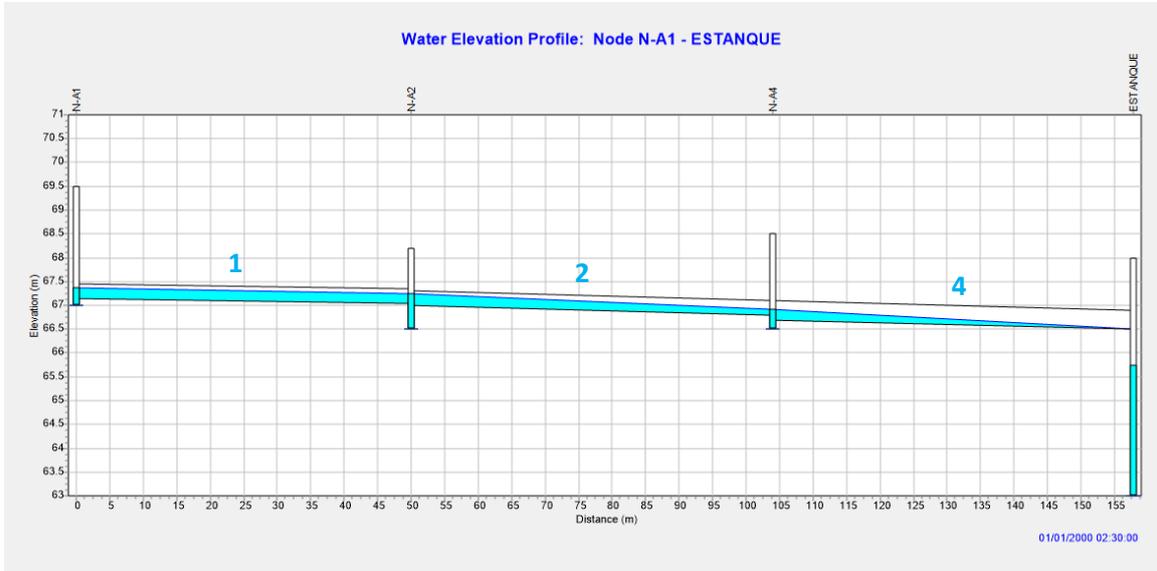


Figura 7.7: Perfil longitudinal tuberías 1,2 y 4

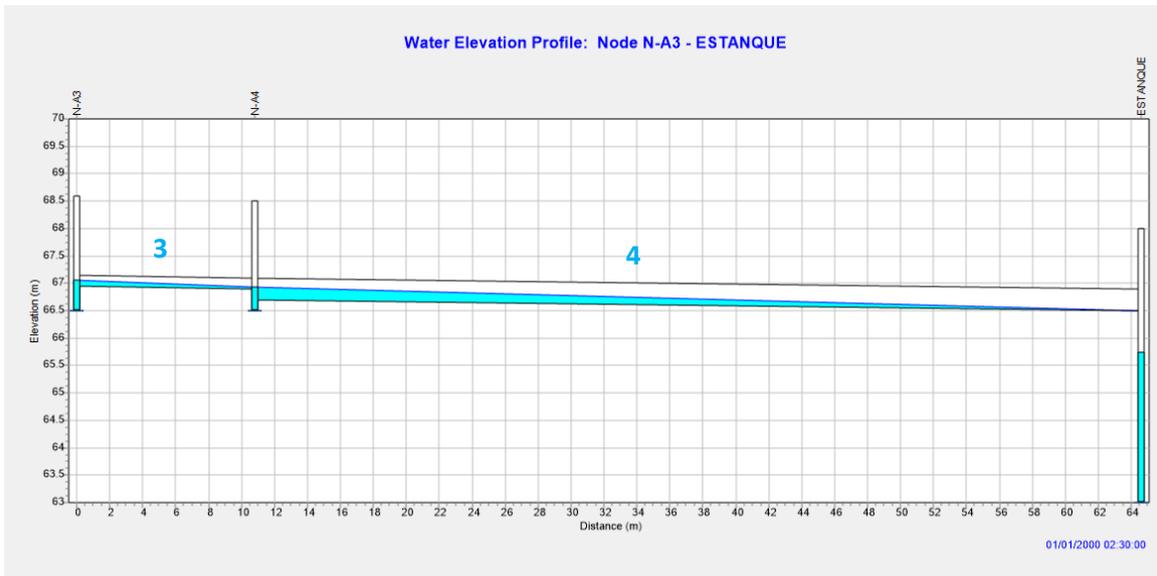


Figura 7.8: Perfil longitudinal tuberías 3 y 4

Tubería	Capacidad hidráulica (%)
1	76
2	79
3	57
4	54

Tabla 7.3: Capacidades hidráulicas máximas

Aunque las tuberías 3 y 4 les sobra capacidad hidráulica, si se reducen los diámetros, estas capacidades superan las máximas. Por ello, se deciden mantener los diámetros escogidos, ya que se encuentran del lado de la seguridad.

Una vez analizados los resultados de la simulación se establecen los diámetros y pendientes escogidos como adecuados.

7.2.4 Disminución cota de solera del cauce natural

Tal y como se comenta en el apartado 6 de esta memoria, la disminución de la cota de solera óptima del cauce que desagua el agua almacenada del estanque es de 0.3 metros con respecto a la cota actual, siendo dicha cota de 65.7 metros. Con ello se consigue almacenar aproximadamente hasta la máxima capacidad en el estanque y a la vez reducir los volúmenes de agua en el humedal (con respecto a las otras alternativas).

En la *figura 7.9* se representa la localización de esta actuación, la cual supone una excavación de 18.5 m³. Además también se plantea el desbroce del cauce y la plantación de césped y cebollino para añadir valor paisajístico al conjunto.

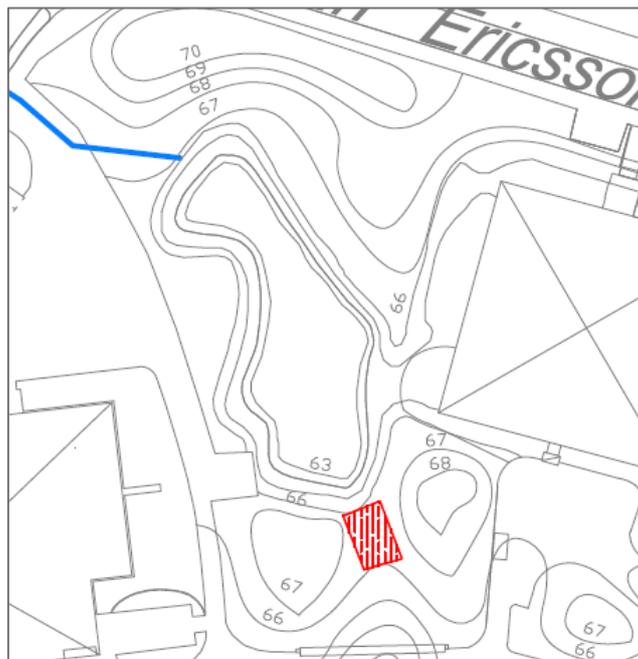


Figura 7.9: Disminución de la cota de solera a 65.7

7.2.5 Ampliación del volumen del humedal

La capacidad del humedal es insuficiente para almacenar la escorrentía provocada por uno de los 1898 eventos modelados. Por eso se plantean las siguientes actuaciones:

- El aumento del volumen en el humedal, incrementando las áreas a las cotas 61 y 62, tal y como se muestra en los Planos 9 y 11. Debido a la pendiente del talud en la margen este del humedal se plantea la colocación de geomalla y posterior replantado. Estas estructuras bidimensionales ayudan a controlar la erosión y a su vez aseguran que los suelos preserven su capacidad para cultivar plantas.

- Relleno en la zona sur del humedal para elevar la cota.
- En la carretera situada al sur se plantea también el aumento de cota en los puntos con cota inferior a 62, hasta los 62.2 metros. Esto conlleva que en algunas zonas se tenga que elevar hasta 0.5 metros la cota de la calle. De esta manera la misma actúa como un pequeño azud el cual impide el paso del agua en caso de inundación, asegurando además mediante el aumento de cota el paso de vehículos en episodios de lluvia con intensidades elevadas. En la *figura 7.10* y en el plano 11 se detallan todas estas actuaciones.

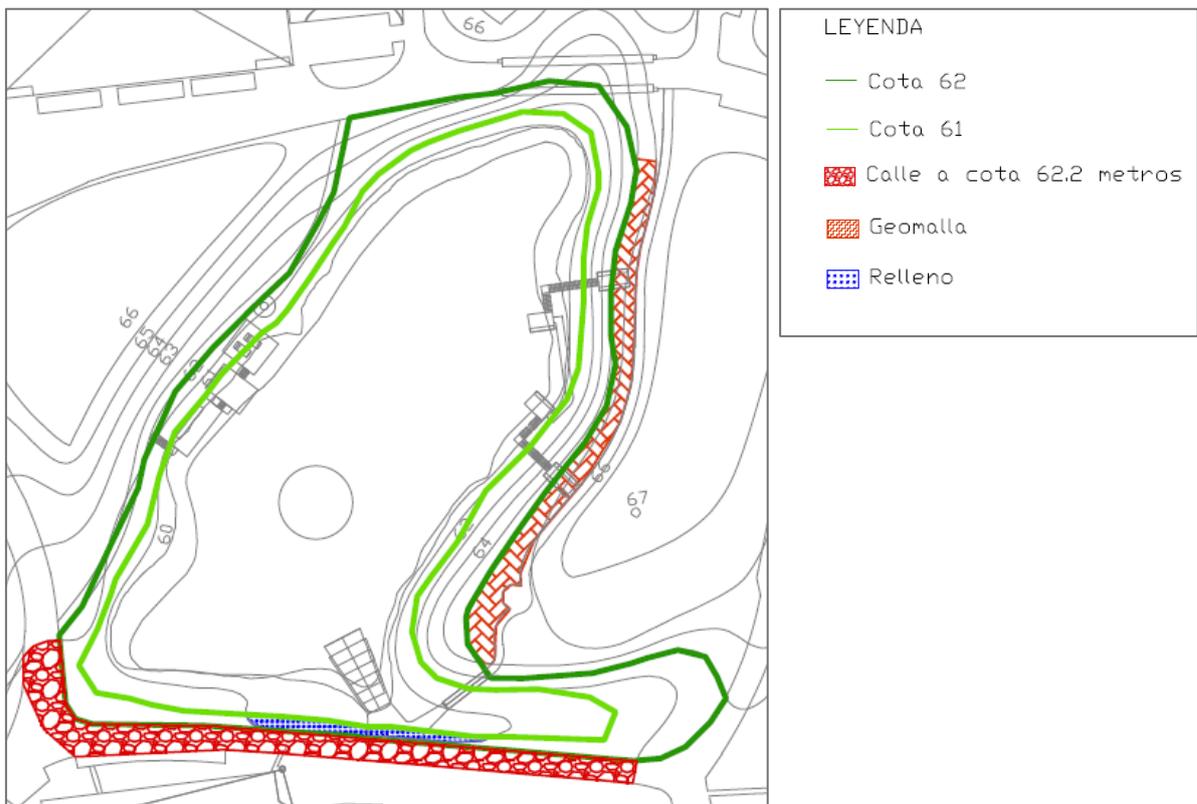


Figura 7.10: Actuaciones en el humedal para evitar las inundaciones

7.3 COMPROBACIÓN

Una vez se modelan todas las actuaciones, se comprueba si con la lluvia de diseño de periodo de retorno de 15 años se producen mayores volúmenes que con el análisis continuo de datos de precipitación cinco-minutales. Para este análisis se parte de los volúmenes iniciales en estanque y humedal, es decir, del volumen justo por debajo de la cota de solera del cauce natural en el estanque, y por debajo de la cota de solera de la tubería de salida en el humedal.

Una vez analizados los resultados obtenidos se comprueba como los volúmenes de agua almacenada en estanque y humedal máximos a partir de la lluvia de diseño son inferiores a los obtenidos a partir del análisis continuo, tal y como se muestra en la *tabla 7.4*. Esto es debido a

que el evento de precipitación que provoca dichos volúmenes en el análisis continuo tiene mayor intensidad y duración que la lluvia de diseño.

	Max Volumen Estanque (m ³)	Max Volumen Humedal (m ³)
Lluvia de diseño T=15 años	3340	2470
Análisis continuo	14970	20369

Tabla 7.4: Comparación de los máximos volúmenes almacenados entre el análisis continuo y la lluvia de diseño.

Por lo tanto se determina que el análisis continuo es más desfavorable al producir mayores volúmenes almacenados, y por tanto, queda del lado de la seguridad las actuaciones propuestas.

8. VALORACIÓN ECONÓMICA

La valoración económica que se realiza pretende ser una estimación aproximada del coste de las actuaciones descritas en el Anejo 6, basándose en la cuantificación de las principales unidades de obra.

En el Anejo 7 se especifican las diferentes unidades de obra. En este mismo anejo se detallan las mediciones de estas unidades, recogidas en la *tabla 8.1*.

Para el cálculo de los volúmenes de excavación y relleno en el humedal se utiliza el *software ArcMap* el cual posee una aplicación para calcular volúmenes por encima y por debajo de una cota determinada. Para las restantes medidas, se utiliza el *software Autocad*, con el cual se pueden medir distancias y áreas.

Unidades de obra	Descripción	Unidades	Precio unitario (€)	Medición	Precio (€)
U01	Excavaciones zona verde, cauce y humedal	m3	4.41	1612.1	7109.36
U02	Excavación para el sistema de drenaje	m3	16.08	114.38	1839.29
U03	Bordillos	m	22.6	324.08	7324.21
U04	Imbornal	Ud	187.22	6	1123.32
U05	Hormigón para rampa de acceso	m3	69.13	47.25	3266.39
U06	Tubería D =200 mm	m	23.89	10.80	258.01
U07	Tubería D =300 mm	m	48.42	104.00	5035.68
U08	Tubería D =200 mm	m	78.88	53.80	4243.74
U09	Pozo de registro	Ud	576.48	1	576.48
U010	Geomalla	m2	3.2	242.80	776.96
U011	Relleno	m3	5.46	68.01	371.33
U012	Relleno de zanja para instalación	m3	2.89	52.22	150.92
U013	Mezcla bituminosa	m2	29.37	445.00	13069.65
					Total=45 145.3

Tabla 8.1: Precios unitarios y totales de las unidades de obra

Una vez realizados los correspondientes cálculos se estima que el presupuesto de ejecución material calculado en base a las principales unidades de obra, asciende aproximadamente a CUARENTA Y CINCO MIL CIENTOCINCuenta euros.

Los precios se obtienen del software proporcionado por CYPE Ingenieros S.A., con el cual es posible conocer los precios unitarios de los elementos utilizados en el proyecto.

9. CONCLUSIONES

A continuación se comentan las principales conclusiones obtenidas al llevar a cabo este trabajo:

- Una vez realizados los pertinentes análisis cualitativos del humedal se determina que el principal problema de calidad en este cuerpo de agua es la elevada turbidez, la cual impide crear biodiversidad acuática en el mismo. Este problema se debe a la acción de las carpas cuando buscan alimento. Para solventar este problema la Universidad plantea la organización de un concurso de pesca, el cual se llevará a cabo por primera vez este mismo verano.
- Debido a que no se encuentra ningún tipo de contaminante en el humedal, no se considera necesario estudiar la calidad del estanque, ya que este se encuentra aguas arriba y vierte sus aguas al humedal. Además al realizar una inspección in situ no se detecta ninguna carpa, comprobando el desarrollo de vegetación acuática en el estanque, y unos valores de turbidez adecuados.
- Sin embargo, un problema que se detecta en humedal y estanque es la falta de mantenimiento en ambos cuerpos de agua. Por ello es necesario ponerse en contacto con los responsables del mantenimiento de esta zona para asegurar la mejora de las tareas de limpieza.
- Como principal conclusión tras el análisis cualitativo del agua en el humedal es que, una vez se reduzca la turbidez, esta agua es apta para su reutilización para limpieza e irrigación.
- En cuanto al análisis cuantitativo, se descubre que con pequeñas actuaciones, las capacidades de humedal y estanque serían suficientes para poder proteger las zonas aledañas contra inundaciones. También se demuestra la posibilidad de ampliar la cuenca drenante, eso sí, llevando a cabo un mayor número de actuaciones para proteger la cuenca contra inundaciones. Como uno de los principales objetivos es el de almacenar mayores volúmenes de agua para poder reutilizarla y así disminuir la cantidad que llega a los sistemas de colectores de la ciudad, se opta por este aumento de la cuenca drenante.
- También se descubre como el análisis continuo de los datos cinco-minutales queda del lado de la seguridad en comparación con el análisis de la cuenca mediante la tormenta de diseño de 15 años de periodo de retorno.

- Tras llevar a cabo las actuaciones pertinentes, se demuestra como no se superan las capacidades de almacenamiento máximas en estanque y humedal, maximizando el volumen almacenado y por tanto reduciendo el caudal captado por el sistema de colectores de la ciudad.

10. REFERENCIAS

- Agencia Estatal de Meteorología. (2015). *Manual de Uso de términos Meteorológicos*.
- Departamento de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura (FAO). (s.f.). *Departamento de Pesca y Acuicultura*. Obtenido de http://www.fao.org/fishery/culturedspecies/Cyprinus_carpio/es
- DIRECTIVA 2006/44/CE DEL PARLAMENTO EUROPEO Y DEL CONSEJO. (2006). *Calidad de las aguas continentales que requieren protección o mejora para ser aptas para la vida de los peces*. Diario Oficial de la Unión Europea.
- DIRECTIVA 76/160/CEE DEL CONSEJO. (1975). *Calidad de las aguas de baño*. Diario Oficial de la Unión Europea.
- Doménech, J. (2002). Control de la calidad del agua. *Sanidad Ambiental*.
- Echarri, L. (1998). *Ciencias de la tierra y del medio ambiente*.
- Food and Agriculture Organization of the United Nations (FAO). (2012). *The Eto Calculator*.
- Food and Agriculture Organization of the United Nations (FAO). (s.f.). *Evapotranspiración del Cultivo. Guías para la determinación de los requerimientos de agua de los cultivos*.
- Grupo Multidisciplinar de Modelación de Fluido. (s.f.). *SWMM Modelo de gestión de aguas pluviales, Manual de usuario*.
- Holmberg, J. (2005). DAGVATTENHANTERING I DJUPBÄCKENS AVRINNINGSSOMRÅDE – NU OCH I FRAMTIDEN. *KTH*.
- J.G.Arnold, Kiniry, J., Srinivasan, R., Williams, J., Haney, E., & Neitsch, S. (2012). *Soil and water assesment tool (SWAT)*. Texas Water Resources Institute.
- Jonsson, S. (2011). AVRINNING FRÅN KÖRBANOR OCH HYDRAULIKEN HOS STENFYLLDA DAGVATTENDIKEN. *KTH*.
- Kravchenko, A. N. (2003). Influence of spatial structure on accuracy of interpolation methods. *Soil Science Society of American Journal* 67:1564-1571.
- L. Lougheed, V., Crosbie, B., & Chow-Fraser, P. (1998). Predictions on the effect of common carp (*Cyprinus carpio*) exclusion on water quality, zooplankton, and submergent macrophytes in a Great Lakes wetland. *Fish.Aquat*.
- Ministerio de Agricultura y Pesca, Alimentación y Medio Ambiente. (s.f.). *Calidad y Evaluación Ambiental*. Obtenido de Metales Pesados: <http://www.mapama.gob.es/es/calidad-y->

evaluacion-ambiental/temas/atmosfera-y-calidad-del-aire/emisiones/prob-amb/metales_pesados.aspx

Perales-Momparler, S., & Andrés-Doménech, N. (2008). Los Sistemas Urbanos de Drenaje Sostenible. *Research Gate*.

REAL DECRETO 1620/2007. (2007). *Régimen jurídico de la reutilización de las aguas depuradas*.

REAL DECRETO 630/2013. (2013). *Catálogo español de especies exóticas invasoras*.

Schloeder, C., Zimmerman, N., & Jacobs, M. (2001). Division S-8 - Nutrient management & soil & plant analysis: Comparison of methods for interpolating soil properties using limited data. *Soil Science Society of America Journal*.

Tikkanen, H. (2013). Hydrological modeling of a large urban catchment using a stormwater management model (SWMM). *Aalto University*.

Urban Drainage and Flood Control District. (2016). *Urban Storm Dainage Criteria Manual Volume 1*.