



Centro Universitario de la Defensa en la Escuela Naval Militar

TRABAJO FIN DE GRADO

*Construcción de un sistema de adsorción a escala de laboratorio
para depuración de aguas de buques con residuos MARPOL*

Grado en Ingeniería Mecánica

ALUMNO: Guillermo Maza Fernández

DIRECTORES: Santiago Urréjola Madriñán
Claudio Cameselle Fernández
Susana Gouveia

CURSO ACADÉMICO: 2020-2021

Universida_{de}Vigo



Centro Universitario de la Defensa en la Escuela Naval Militar

TRABAJO FIN DE GRADO

*Construcción de un sistema de adsorción a escala de laboratorio
para depuración de aguas de buques con residuos MARPOL*

Grado en Ingeniería Mecánica
Intensificación en Tecnología Naval
Cuerpo General

Universida_{de}Vigo

RESUMEN

El cumplimiento del convenio MARPOL hace necesario el estudio de diferentes métodos de descontaminación de aguas. La adsorción se trata de un proceso que permite que sustancias contaminantes, que se encuentran en el agua u otro disolvente, puedan adherirse a una sustancia denominada adsorbente, disminuyendo de esta manera la concentración del contaminante que se encuentra presente. Por ello, se trata de un proceso de descontaminación de aguas residuales que en trabajos previos ha demostrado su efectividad.

En este trabajo de fin de grado se busca construir una planta piloto a escala de laboratorio que permita probar el método de adsorción mencionado para el tratamiento de aguas contaminadas. Se probarán varias configuraciones hasta llegar a la que se considera que funciona mejor y ofrece mayor versatilidad de uso. Posteriormente, se realizará una prueba experimental para comprobar el correcto funcionamiento de la planta piloto. El agua que se usará en la prueba experimental estará contaminada con CuSO_4 , ya que se disponían de datos obtenidos en experimentos previos con los que poder comparar.

PALABRAS CLAVE

Adsorción, planta piloto, diseño y construcción, tratamiento de aguas residuales, MARPOL.

AGRADECIMIENTOS

Quiero comenzar agradeciendo el apoyo que me han dado mi familia, novia y amigos desde el principio de la elaboración de este trabajo de fin de grado.

Referirme también a mis tutores, en especial a Don Santiago Urréjola, por las horas dedicadas al desarrollo de este trabajo y por su permanente disponibilidad para ayudar con todo lo que fuese necesario para conseguir los objetivos propuestos en él.

También a Doña Rocío Maceiras y Doña Rosa Devesa, que apoyaron con sus ideas ante algún momento en el que el no desarrollo del proyecto agobiaba y provocaba desesperación.

Por último, agradecer a Manuel Cervera Sáenz de Santa María tanto su apoyo como amigo como compañero en la realización del trabajo, cuya ayuda ha sido básica para finalmente lograr conseguirlo.

CONTENIDO

| | |
|---|----|
| Contenido | 1 |
| Índice de Figuras | 3 |
| Índice de Tablas..... | 5 |
| 1 Introducción y objetivos | 6 |
| 1.1 Introducción | 6 |
| 1.1.1 Importancia del agua..... | 6 |
| 1.1.2 Convenio MARPOL | 7 |
| 1.2 Aguas contaminadas | 8 |
| 1.2.1 Aguas naturales y su contaminación..... | 9 |
| 1.2.2 Tipos de aguas residuales | 9 |
| 1.2.3 Contaminantes del agua..... | 9 |
| 1.2.4 Tratamientos de aguas contaminadas | 11 |
| 1.3 Objetivos..... | 12 |
| 2 Estado del arte | 13 |
| 2.1 Metales pesados y su presencia en ecosistemas acuáticos | 13 |
| 2.1.1 Cobre..... | 15 |
| 2.2 Bio-acumulación y biosorción | 15 |
| 2.2.1 Factores que afectan al proceso de biosorción. | 17 |
| 2.2.2 Tipos de biomasa empleados en la biosorción. | 17 |
| 2.3 Proceso de adsorción para depuración de aguas residuales | 17 |
| 2.3.1 Adsorción a través de algas. | 19 |
| 2.3.2 Adsorción a través de carbón activo. | 21 |
| 3 Desarrollo del TFG..... | 24 |
| 3.1 Metodología | 24 |
| 3.1.1 Procedimiento | 24 |
| 3.1.2 Materiales y reactivos utilizados en la experimentación | 25 |
| 3.1.3 Diseño y construcción de la planta piloto..... | 27 |
| 3.2 Desarrollo experimental | 36 |
| 3.2.1 Metodología empleada en la experimentación | 36 |
| 3.2.2 Adsorbente inmovilizado..... | 39 |
| 3.2.3 Preparación de la planta piloto para la experimentación | 41 |
| 4 Resultados | 42 |
| 4.1 Resultados y análisis | 42 |

| | |
|---|----|
| 4.1.1 Diseño y construcción de la planta piloto | 42 |
| 4.1.2 Resultados y análisis fase experimental | 43 |
| 5 Conclusiones y líneas futuras | 47 |
| 5.1 Conclusiones | 47 |
| 5.2 Líneas futuras | 47 |
| 6 Bibliografía..... | 49 |

ÍNDICE DE FIGURAS

| | |
|---|----|
| Figura 1-1. Vertidos del uso humano expulsados al exterior sin tratamiento previo [3]. | 6 |
| Figura 1-2. Tipos de contaminantes según su naturaleza. | 10 |
| Figura 1-3. Indicadores de la contaminación del agua. | 11 |
| Figura 2-1. Ciclo biogeoquímico de los metales pesados [13]. | 15 |
| Figura 2-2. Adsorción. | 18 |
| Figura 2-3. Diferencias entre adsorción y absorción (Elaboración propia). | 18 |
| Figura 2-4. Tipos de adsorción en función de su naturaleza. | 18 |
| Figura 2-5. Espirulina en su estado natural [24]. | 19 |
| Figura 2-6. Micrografía de luz de Arthrospira Platensis. | 21 |
| Figura 3-1. Metodología seguida para el trabajo fin de grado. | 24 |
| Figura 3-2. Medidor de pH y conductividad. | 25 |
| Figura 3-3. Espectrofotómetro. | 26 |
| Figura 3-4. Válvula de tres vías. | 26 |
| Figura 3-5. Bomba sumergible. | 27 |
| Figura 3-6. Diseño inicial. | 29 |
| Figura 3-7. Segundo diseño. | 30 |
| Figura 3-8. Cartucho utilizado para el segundo diseño | 31 |
| Figura 3-9. Diseño definitivo utilizado para la construcción de la planta piloto. | 32 |
| Figura 3-10. Pecera utilizada como tanque del medio hídrico. | 33 |
| Figura 3-11. Extractor Soxthlet usado como columna de adsorción. | 33 |
| Figura 3-12. Salida del medio hídrico a través de la bomba y posterior división en dos salidas gracias a válvula de tres vías. | 34 |
| Figura 3-13. Tubo de espirocristal utilizado en el diseño. | 34 |
| Figura 3-14. Construcción de planta piloto para utilización de adsorbentes de bajo coste. | 35 |
| Figura 3-15. Longitud de onda en la que trabaja la disolución de sulfato de cobre y amoniaco. | 38 |
| Figura 3-16. Recta de calibrado de sulfato de cobre (II). | 39 |
| Figura 3-17. Esferas de espirulina y carbón activo inmovilizado. | 41 |
| Figura 3-18. Forma de la que quedan colocadas las esferas de adsorbente (Espirulina a la izquierda y carbón activo a la derecha). | 41 |
| Figura 4-1. Esquema del diseño elegido para la planta piloto a escala de laboratorio. | 42 |
| Figura 4-2. Construcción final previa a la realización de la fase experimental. | 43 |
| Figura 4-3. Gráfica representativa de variación de la concentración de contaminante presente tras usar espirulina. | 45 |
| Figura 4-4. Gráfica representativa de variación de la concentración de contaminante presente tras usar carbón activo. | 46 |

ÍNDICE DE TABLAS

| | |
|---|----|
| Tabla 1-1. Resumen de las reglas del convenio MARPOL para aguas residuales y sus tratamientos. | 8 |
| Tabla 2-1. Ventajas y desventajas de la bio-acumulación y la biosorción. | 16 |
| Tabla 2-2. Tipos de adsorbentes. | 16 |
| Tabla 2-3. Composiciones estándar del polvo de la espirulina. | 20 |
| Tabla 2-4. Clasificación de los poros. | 22 |
| Tabla 3-1. Material y reactivos necesarios para la realización de la recta de calibrado. | 36 |
| Tabla 3-2. Valores de la concentración utilizada y sus valores de adsorbancia asociados. | 38 |
| Tabla 3-3. Materiales y reactivos utilizados para las esferas de adsorbente inmovilizado. | 40 |
| Tabla 4-1. Valores de las mediciones realizadas con espirulina. | 44 |
| Tabla 4-2. Valores de las mediciones realizadas con carbón activo. | 45 |

1 INTRODUCCIÓN Y OBJETIVOS

1.1 Introducción

1.1.1 Importancia del agua

En la actualidad, la contaminación, donde está incluida la polución de las aguas, es uno de los principales problemas a los que la población mundial considera que se le ha de dar solución de manera prioritaria.

Enfocando más el tema en lo que se refiere al medio hídrico y sus contaminantes se ha de destacar que el agua es un elemento de la naturaleza, componente de los ecosistemas naturales, fundamental para el mantenimiento y reproducción de los seres vivos en la Tierra, ya que el agua es esencial para el desarrollo de los diferentes tipos de procesos que hacen posible la vida [1].

La contaminación del agua que existe es cada vez de mayor gravedad y eso queda patente en datos que ofrece la Organización de Naciones Unidas tales como que más del ochenta por ciento de las aguas residuales resultantes del uso por humanos se vierten posteriormente a ríos o al mar sin realizar tratamientos, o que más del cuarenta por ciento de la población mundial tiene problemas de escasez de agua [2].



Figura 1-1. Vertidos del uso humano expulsados al exterior sin tratamiento previo [3].

No solo la ONU dedica alguno de sus objetivos a corto y largo plazo a los tratamientos de las aguas residuales, sino que la Organización Mundial de la Salud lo destaca entre sus principales líneas de trabajo

de cara a años posteriores. La OMS presenta también varias ideas fuerza de las consecuencias de no realizar un correcto saneamiento de aguas residuales [4]:

- Se estima que al menos el 10% de la población mundial consume alimentos regados con aguas residuales.
- Un saneamiento deficiente va asociado a la aparición de muchos tipos de enfermedades como la hepatitis, el cólera o la disentería.
- Se estima que el saneamiento deficiente causa 280.000 muertes por diarrea cada año y es un factor importante en la aparición de otras enfermedades.

Tras observar los datos más reseñables relacionados con aguas residuales y su saneamiento según la ONU y la OMS se ve que a pesar de tener presente la necesidad de un cambio, no es fácil conseguirlo y requiere de esfuerzo y colaboración de todos los miembros de la sociedad.

Por tanto, queda clara la importancia de los tratamientos de las aguas, demostrando así la funcionalidad de este trabajo de fin de grado. En este caso, basado en la limpieza de aguas contaminadas con absorbentes de bajo coste, y si es posible su posterior aplicación en buques que en la mar deben tratar las aguas que tras su uso se expulsan al exterior cumpliendo así el convenio MARPOL¹, un convenio internacional para prevenir la contaminación provocada por los buques [5].

Además de los datos expuestos de la preocupación sobre la calidad del agua que consume parte de la población, la OMS y la ONU exponen varios objetivos de lo que considera que son sus guías a seguir para años venideros como son la salud y bienestar, vida submarina y agua limpia y saneamiento. Se observa que estos objetivos van estrechamente unidos a los objetivos de este trabajo, que al final no son otros que la limpieza de aguas contaminadas mediante la construcción de una planta piloto a escala de laboratorio para conseguir estudiar sistemas que cumplan las medidas establecidas en MARPOL y, por tanto, cuidar el entorno en el que los buques trabajan [2]. Por tanto, se puede ver aquí el porqué de la elección de este trabajo de fin de grado y como poder aplicarlo en un futuro cercano.

Para la Armada todas las normas establecidas en este convenio no son de obligado cumplimiento, pero como ejemplo que debe ser para el resto de la sociedad, si son recomendables de seguir siempre que se pueda.

1.1.2 Convenio MARPOL

Este epígrafe va guiado a la explicación de las normas del convenio MARPOL [6]. Como se expone antes, este convenio es un conjunto de normativas que tienen como objetivo evitar la contaminación producida por los buques.

Su aprobación inicial fue en 1973, pero a lo largo de los años ha ido sufriendo modificaciones, y actualmente hasta 119 países lo han ratificado comprometiéndose a su cumplimiento.

Según la publicación del BOE del martes 28 de junio de 2005 se describen una serie de características de las aguas sucias. Primero, y antes de desarrollar estas características, se puede observar en la Tabla 1-1 un resumen de las principales reglas disponibles en el convenio MARPOL relacionado con las aguas residuales y sus tratamientos [6]:

¹ Polución marina

| Principales reglas del convenio MARPOL relacionadas con las aguas residuales |
|--|
| Definición de lo que se considera aguas residuales procedentes de los diferentes buques. |
| Tipos de buques que deben cumplir el convenio MARPOL. |
| Distintas instalaciones que se deben tener de manera obligatoria en los diferentes buques. |
| Condiciones que se deben cumplir para la descarga de las aguas sucias y cuándo será aprobada o no. |

Tabla 1-1. Resumen de las reglas del convenio MARPOL para aguas residuales y sus tratamientos.

A continuación, se van a desarrollar de la manera más clara y concisa posible, estas reglas enumeradas. El convenio está dividido en capítulos que a su vez están divididos en una serie de reglas.

En primer lugar, en la normativa vigente para prevenir la contaminación de las aguas, se define en la primera regla del capítulo 1 todo lo que se considera como aguas sucias. Son las siguientes: los desagües y residuos procedentes de urinarios, lavaderos, lavabos y conductos de salida en cámaras de servicios médicos y aguas procedentes de lugares donde se transporten animales vivos.

En segundo lugar, centrándose en el ámbito de aplicación señala en el mismo capítulo todos los buques que deben cumplir este convenio y ofrece todas las características de dichos buques. Básicamente dentro del ámbito de aplicación que más se acerca a la situación relacionada con el trabajo, todos los buques de la Armada española deben cumplirlo.

Después de explicar en detalle qué es lo que se considera aguas sucias y la aplicación a la mayor parte de los buques, el convenio MARPOL se centra en los sistemas de tratamiento de aguas sucias. Para ello en el capítulo 3, en la regla 9 se señala que todo buque que esté dentro del ámbito de aplicación de la regla 2, debe tener distintas instalaciones que sirvan para el tratamiento de esas aguas residuales, entre las que destacan: una instalación de tratamiento, un sistema para desmenuzar y desinfectar esas aguas residuales y un tanque de retención para poder mantener en algún lugar que no se mezcle con aguas limpias todas esas aguas contaminadas. Los tres puntos anteriores siempre deben cumplir todo lo que la administración determine según normas y métodos de prueba elaborados por la Organización.

Finalmente, como punto destacado, se menciona en la regla 11 la descarga de estas aguas sucias y cuando será aprobada esta descarga al exterior o no. El primer requisito a cumplir deberá ser la distancia a la que expulsan los buques estas aguas sucias: a tres millas si las aguas están desmenuzadas y desinfectadas y a más de doce millas si no se ha realizado este proceso previo. Pero este requisito de expulsión sólo se cumplirá si además previamente el buque ha utilizado una instalación de tratamiento de aguas sucias. Esta instalación debe tener el certificado ya antes explicado y además el efluente de descarga no puede producir sólidos flotantes visibles ni colorar las aguas que se encuentren en las zonas circundantes.

Como se puede obtener tras el análisis del convenio firmado en 2005, los buques cada vez tienen que llevar a cabo más procesos de descontaminación de las aguas residuales expulsadas al mar, y eso demuestra la importancia que tiene el agua en la sociedad, y por ello cada vez se busca más evitar su contaminación [6].

1.2 Aguas contaminadas

Como consecuencia de los diferentes motivos expuestos anteriormente, se obtiene de conclusión que las aguas que han sido usadas y se han convertido, por tanto, en aguas residuales, deben tener un proceso de saneamiento previo antes de volver a la naturaleza. Por supuesto, la frase anterior sigue la misma aplicación para barcos y la expulsión de sus aguas residuales al mar. Para ello, se expondrán una serie de puntos que engloban los diferentes contaminantes existentes y también los modos para tratar esos contaminantes y así eliminarlos del medio hídrico.

1.2.1 Aguas naturales y su contaminación

Contaminar significa introducir en un medio, en este caso el agua, cualquier tipo de sustancia extraña o forma de energía que tenga la posibilidad de alterar la proporción de elementos iniciales que tuviese al principio o provocar efectos dañinos en el medio inicial. Centrándose en el concepto de contaminación ambiental (relacionada con el agua) se trata de cualquier modificación, natural o artificial, que altera el equilibrio de la misma [7].

Las aguas naturales tienen grandes cantidades de gases disueltos entre los que abundan el oxígeno, el nitrógeno y el dióxido de carbono. Estos pueden producirse por disolución de gases atmosféricos y por la actividad y descomposición de seres vivos. También se encuentran iones, sólidos en suspensión (procedentes de erosión) y cantidades variadas de materia orgánica, pudiéndose encontrar estas últimas disueltas o suspendidas en el medio hídrico citado.

Después de definir el término contaminar y lo que son las aguas naturales, se explica el concepto de agua contaminada, que es aquella cuya composición y estado se ve alterado por los cambios realizados por la acción del ser humano. Cuando se considera que el agua está contaminada, ya no es apta para sus principales funciones, es decir, no es de utilidad para la industria, la pesca, la vida natural y el uso humano.

Además, se deben destacar tres aspectos principales: la calidad del agua bien fijada por el agua natural de la que proviene, la contaminación según el uso al que esté destinado el agua y que un correcto tratamiento posibilita que las aguas residuales puedan ser reutilizables:

Los compuestos o elementos que pueden contaminar el medio hídrico son de gran variedad y en consecuencia eso da lugar a diferentes tipos de aguas residuales existentes.

1.2.2 Tipos de aguas residuales

Por tanto, se sabe que las aguas naturales cuando son contaminadas pasan a ser aguas residuales. La definición para aguas residuales sugiere que son aquellas que no tienen valor inmediato para el propósito para el que se produjo.

Las aguas residuales pueden ser de muchos tipos, y dependen principalmente de su origen:

- Doméstica: zonas residenciales, instalaciones comerciales e instalaciones públicas.
- Industrial: vertidos industriales.
- Agropecuaria: actividades agrícolas y ganaderas.
- Aguas pluviales: escorrentía superficial.
- Infiltración y aportaciones incontroladas: entradas por diferentes motivos en la red de alcantarillado.

Según su origen, el tratamiento de cada modelo de agua residual será diferente pues su concentración y tipo de contaminante existente es diferente. Para poder diseñar se debe seguir un proceso que no se centre en un contaminante determinado, sino que tenga una definición de parámetros generales para cada tipo de contaminación.

1.2.3 Contaminantes del agua

A continuación, se procede a definir los diferentes contaminantes analizándolos según su naturaleza. En la Figura 1-2, se observa esta clasificación [8].

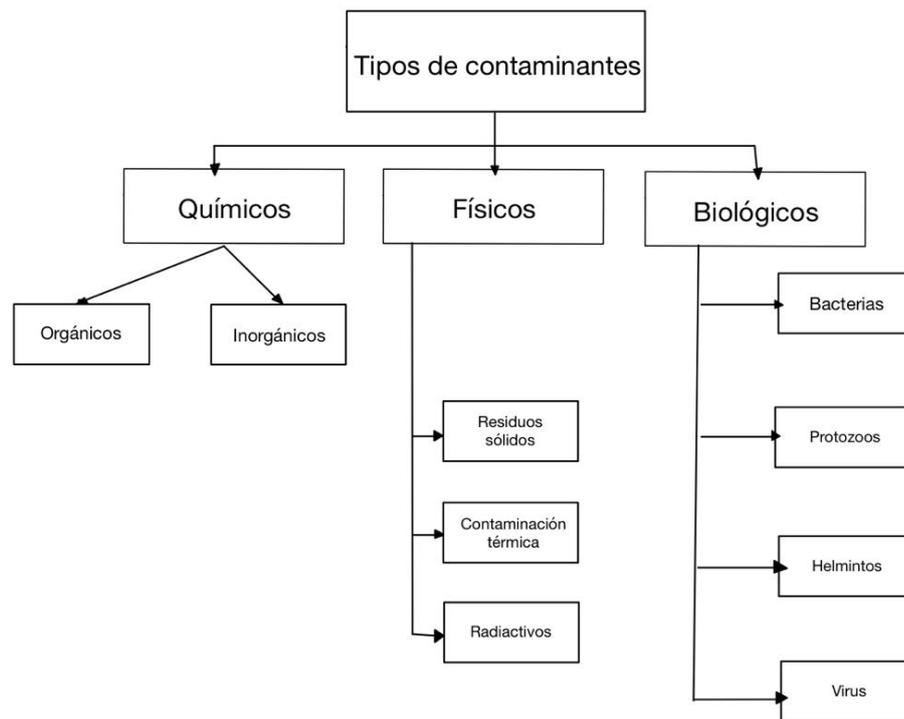


Figura 1-2. Tipos de contaminantes según su naturaleza.

Los tres tipos de contaminantes principales (químicos, físicos y biológicos) tienen subdivisiones.

- Los químicos pueden ser orgánicos (materia orgánica, pesticidas, antibióticos...) o inorgánicos (metales pesados, ácidos y bases, gases...).
- Los físicos se pueden clasificar en tres tipos: residuos sólidos (que son partículas arrastradas por agua o lluvia), contaminantes térmicos (aumento de temperatura disminuye la solubilidad del oxígeno que por tanto aumenta velocidad de las reacciones y aparecen diferentes microorganismos) y los radiactivos
- Los biológicos son organismos patógenos responsables de la transmisión de algunas de las enfermedades que afectan a los seres vivos. Por tanto, que existan contaminantes biológicos significa que esta agua no es apta para el consumo. Dentro de este tipo, pueden ser diferentes organismos como bacterias, protozoos, helmintos y virus.

Además de los tipos de contaminantes, existen también lo que se conoce como indicadores de contaminación. Un indicador recibe la definición de un elemento que es capaz de determinar la existencia de un patógeno. Un indicador ambiental es una medida física, química y biológica que representa los diferentes elementos de un ecosistema [9].

En la Figura 1-3, se exponen los diferentes tipos de indicadores según su naturaleza y que son claves para diferenciar los tipos de tratamientos que deben llevar a cabo las aguas residuales.

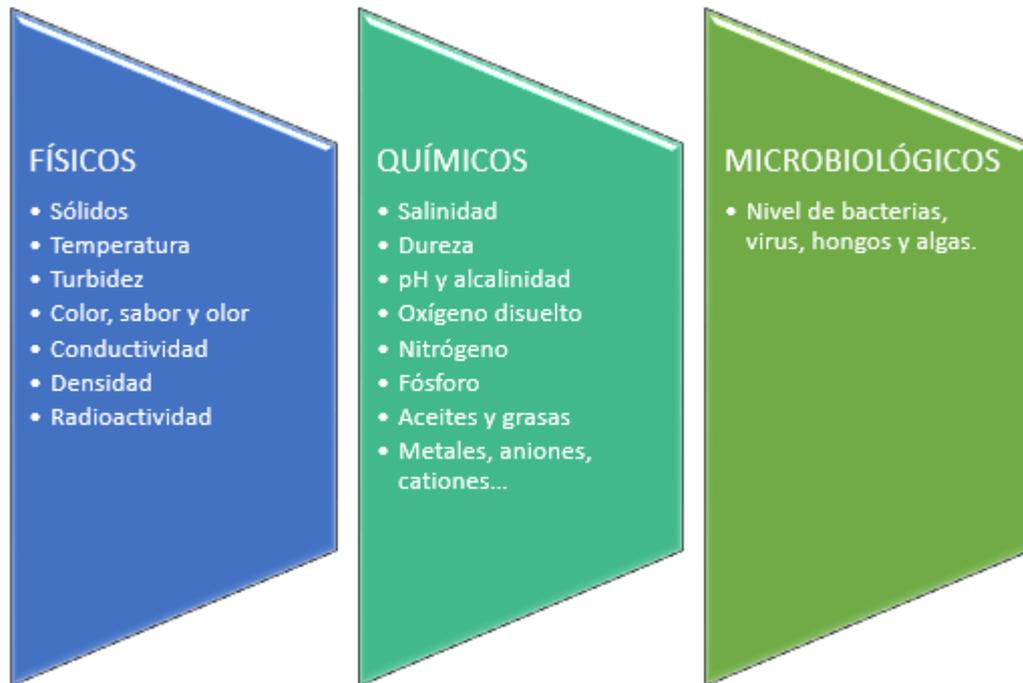


Figura 1-3. Indicadores de la contaminación del agua.

Cuando alguno de los diferentes indicadores presentes en la Figura 1-3 se encuentre fuera de los valores recomendables, será necesario someterla a algún tipo de tratamiento.

1.2.4 Tratamientos de aguas contaminadas

Según se observa en los puntos anteriores, el agua es vital para la supervivencia del planeta y de los seres vivos, pero existen una elevada y variada cantidad de contaminantes que hace que no sea válida.

Para ello, durante el transcurso del tiempo y gracias al aumento del conocimiento del entorno se han ido descubriendo y utilizando una serie de procesos para descontaminar esas aguas, ya sean para devolverlas al medio ambiente o para utilizarlas para la vida cotidiana. Esos tratamientos a los que debe ser expuesta pueden ser, como ya se indicó anteriormente, químicos, físicos y biológicos.

De esos tratamientos, cabe destacar como los más notables los que a continuación se relacionan. Todos ellos han sido referenciados con una publicación de la Organización Mundial de la Salud llamada “Guías para la calidad del agua potable” [10]. Cada tratamiento como bien viene reflejado en esta publicación tiene diferentes utilidades y se elegirá cada tipo según las condiciones finales de agua que se busquen. Para ello se reflejarán varios de los tratamientos más importantes en la actualidad usados para la descontaminación de las aguas residuales.

- **Cloración:** este proceso tiene diferentes modos para realizarse, pero básicamente es diluir cloro en agua para conseguir eliminar los organismos presentes que no deben estar. Su intención principal es la eliminación microbiana, pero las propiedades del cloro ofrecen también la posibilidad de eliminar sustancias químicas. Destacar de este método que es el clásico, es decir, el utilizado por excelencia para los tratamientos del agua.
- **Ozonación:** este proceso sirve también para la desintoxicación del agua. Su función es destruir bacterias, coloides y virus presentes en el agua.
- **Intercambio de iones:** se van cambiando iones por otros de igual carga. Su funcionamiento básicamente consiste en que el agua fluye por un lugar donde existe una resina catiónica para que se produzca el proceso iónico. Esta resina se debe regenerar cada vez que la resina pierde dichos iones positivos.

- Sedimentación: se trata de un proceso físico y consigue que los sólidos en suspensión, en su mayoría, precipitan por el efecto de la gravedad y por tanto acaben en el fondo.
- Aeración: es un proceso cuya función consiste en eliminar gases y compuestos volátiles, y se consigue gracias al arrastre del agua. El problema es que este proceso necesita una planta muy especializada y compleja. Se usa para conseguir eliminar las sustancias orgánicas volátiles. Además, existen diferentes modos dentro de la aeración entre los que se encuentran aeradores de aspersión o de aire difuso.
- Ósmosis inversa: otro de los procesos más conocidos dentro de los tratamientos de aguas residuales. En este caso, se trata de mover un solvente de menor concentración a otro de mayor concentración gracias a una membrana semipermeable. Lo que se consigue como disolución final es una muy concentrada y otra muy diluida. Este método se suele utilizar muy comúnmente para la potabilidad del agua, ya que consigue una disolución sin prácticamente organismos.
- Tratamiento con luz ultravioleta: es una opción muy popular en el tratamiento de aguas. Su funcionamiento es pasar el agua a través de una cámara de flujo y rayos ultravioleta. Estos rayos destruyen bacterias e inactivan muchos virus. Se consiguen eliminar microorganismos como bacterias, virus y hongos. Por último, destacar como beneficios que no se usan productos químicos y que no elimina minerales beneficiosos del agua.
- Destilación: es uno de los métodos más antiguos descubiertos y aún sigue en uso hoy en día. Consiste en una evaporación para eliminar bacterias, contaminantes orgánicos e inorgánicos.
- Adsorción: se trata de un fenómeno por el cual un elemento atrae hacia su superficie todos aquellos contaminantes que se quieren eliminar de otro compuesto. El adsorbente atrae a los adsorbatos debido al enlace del que disponen.

Según el contaminante presente en el agua, el proceso de descontaminación será más o menos efectivo. Este trabajo tras la construcción de la planta piloto pretende mediante el proceso de adsorción centrarse en la eliminación de uno de los contaminantes más tóxicos, los metales pesados. En la fase de experimentación que se realiza en el trabajo se utilizarán dos tipos de adsorbentes para eliminar un tipo de metal pesado (el cobre).

1.3 Objetivos.

El objeto principal que persigue este trabajo de fin de grado es el diseño, construcción y prueba de una planta piloto de adsorción a escala de laboratorio sobre la que se puedan realizar ensayos. Los objetivos específicos son:

1. Justificar la disposición de los elementos de los equipos que se van a utilizar para esta planta piloto.
2. Conocer y probar la mejor forma posible de ubicar los adsorbentes de bajo coste para que funcionen e intervengan el flujo cíclico del sistema construido.
3. Tras la construcción de la planta piloto, se pretende realizar una fase experimental del proceso de adsorción aplicado dentro de la propia planta. Para ello, la intención es utilizar dos adsorbentes distintos (la espirulina y el carbón activo). Con esta fase experimental se pretende:
 - a. Tomar medidas de parámetros característicos del agua y gracias a ello analizar cómo le pueden afectar distintos contaminantes.
 - b. Obtener las conclusiones pertinentes basándose en los resultados obtenidos tras realizarse el proceso de adsorción.
4. Plantear distintas configuraciones de planta piloto para realizar futuros ensayos que puedan ofrecer mejores condiciones.

2 ESTADO DEL ARTE

Como se habla en la introducción, el agua es el elemento de mayor necesidad para la vida del ser humano y de cualquier otro ser vivo. Pero aquí nace el problema, y no es otro que el agua que se necesita no siempre está en condiciones de ser usada. Por tanto, el agua necesita tratamientos para poder ser utilizada y dentro de estos, se pueden diferenciar muchos procedimientos de descontaminación.

Tras la explicación de lo que se considera un agua residual, es también importante que el trabajo de fin de grado se basa en usar adsorbentes de bajo coste como producto para depurar las aguas. Se pretende diseñar una planta piloto a escala de laboratorio, que circule en régimen de flujo semicontinuo, para probar adsorbentes de bajo precio.

Dentro de los diferentes tipos de tratamientos que se explican en la introducción, definir la adsorción, el proceso elegido para este trabajo de fin de grado, como la adhesión de diferentes átomos, iones o moléculas de gas, líquido y sólido disueltas en la superficie. Lo que hace el proceso de adsorción es crear una capa de adsorbente en su superficie. La principal diferencia con la absorción sería que esta implica todo el volumen del absorbente, mientras que el adsorbente sólo implica la superficie [11].

Este trabajo de fin de grado no es el primero que busca la efectividad de los adsorbentes para la descontaminación de aguas contaminadas. El alférez de navío Iñaki Paz Armada en el año académico 2017-2018, realizó un trabajo de fin de grado que probaba diferentes residuos orgánicos de bajo coste como la espirulina o el carbón activo, entre otros, para el tratamiento de aguas [12]. Con los datos presentes en investigaciones anteriores, se utilizarán para la fase experimental la espirulina y el carbón activo como adsorbentes.

2.1 Metales pesados y su presencia en ecosistemas acuáticos

El convenio Marpol es un convenio internacional para control de la contaminación marítima. En muchas de las reglas que aparecen dentro del mismo, se indica la importancia de un buen tratamiento de las aguas residuales con metales pesados en su composición. Por ejemplo, en la regla 3, se nombra la prohibición de echar al mar toda materia que contenga metales pesados (por considerarlos muy tóxicos). Esto demuestra la importancia del tratamiento de metales pesados y en este trabajo se buscará solucionarlo a través del proceso de adsorción. Por ello, a continuación, se explicarán una serie de generalidades de los metales pesados.

La contaminación por metales pesados se trata de un problema ambiental muy serio y que va en aumento. Diferentes ámbitos como la minería, la industria de fertilizantes o la de producción de combustible entre otros, producen residuos que contienen los metales pesados citados. Estos metales traen consecuencias ambientales graves para el ecosistema y también para la salud del ser humano [13].

En todos los ecosistemas acuáticos se pueden encontrar grandes cantidades de iones, muchos de ellos provenientes de materiales y estructuras geológicas presentes en la Tierra. Muchos de estos iones se encuentran en forma mayoritaria, pero otros, como los metales pesados, se encuentran en forma de trazas siendo, en las cantidades adecuadas, necesarios para el desarrollo de la vida de microorganismos, plantas y animales.

La contaminación de estos ecosistemas acuáticos se dará cuando haya un aumento o disminución de las concentraciones de sustancias ya existentes debido a la influencia humana, o cuando aparecen, también por la acción del hombre, compuestos o elementos que no deberían estar. De estos componentes que se enumeran como contaminantes, uno de los más tóxicos son los metales pesados (como el cobre, cromo o cadmio, entre otros) [14].

Estos metales pesados pueden contaminar los ecosistemas de diferentes maneras, que se describen a continuación:

- Contaminación de aguas superficiales por metales pesados: las industrias son los principales causantes de esta contaminación, comenzando con la Revolución Industrial. Al principio los cursos de los ríos soportaban todo lo que las industrias vertían gracias a su capacidad autodepuradora. Con el aumento de los núcleos urbanos y por tanto de los vertidos, se perdió esa capacidad y se producen grandes alteraciones. Estos metales pesados no se eliminan de manera natural porque no son biodegradables, de hecho, son muy contaminantes. Estos metales tienen un gran significado como indicadores de la calidad ecológica debido a la toxicidad y carácter bioacumulativo.
- Contaminación de sedimentos por metales pesados: la acción del hombre produce vertidos que aumentan la cantidad de metales pesados en sedimentos fluviales. Según la forma que tengan de asociarse, los metales se solubilizan o no durante las distintas etapas estacionales (estiaje, crecida, etc.). En estos casos, la reducción de ciertos elementos puede ocasionar la solubilización de otros metales tóxicos. Estos sedimentos pueden llegar a estar en contacto con el ser humano, teniendo en cuenta que son tóxicos.
- Metales pesados en la materia en suspensión: el tipo y cantidad de materia en suspensión en las aguas depende de distintas características como geología, orografía o la vegetación presente. La mayoría de esta materia en suspensión procedente de un saneamiento incorrecto de aguas residuales favorece la adhesión de metales pesados tóxicos.
- Bioacumulación de los metales pesados y factores que la modifican: como se explica en puntos anteriores, ciertos metales pesados son indispensables para la vida, pero pequeñas variaciones de esas pequeñas concentraciones pueden ocasionar efectos nocivos. Todo ello depende de factores que pueden ser: factores inherentes al metal, físico-químicos, etc.

En la Figura 2-1 se puede observar el ciclo biogeoquímico que seguirán los metales:

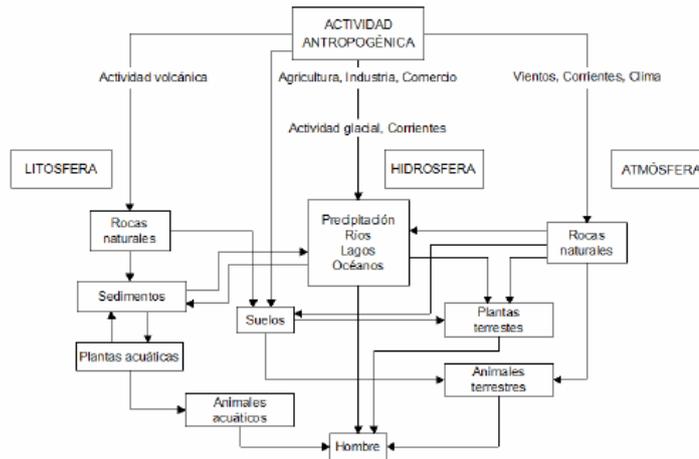


Figura 2-1. Ciclo biogeoquímico de los metales pesados [13].

Debido a que la fase experimental en este trabajo de fin de grado se va a realizar con un agua contaminada con cobre, a continuación, se hablará del mismo brevemente en el siguiente epígrafe.

2.1.1 Cobre

Se trata de un elemento abundante en toda la corteza terrestre. Se encuentra principalmente en forma de sulfatos, carbonatos y sulfuros de Fe y Cu. El cobre en soluciones acuosas puede estar de dos formas: Cu^{2+} o Cu^{1+} .

Este metal tiene tendencia a concentrarse en los óxidos de manganeso sedimentarios y en fracciones de minerales de arcilla. También tiene facilidad en adsorberse sobre las partículas sólidas en suspensión e incorporarse rápidamente al sedimento. También puede precipitar o formar complejos con otros iones. Por último, tiene facilidad para adsorberse en partículas sólidas en suspensión e incorporarse al sedimento.

Para finalizar, el cobre tiene una elevada cantidad de aplicaciones industriales: fabricación de cables, bobinas, calderas, etc. Por ello, al ser tan utilizado, sin un saneamiento adecuado se pueden producir concentraciones en las aguas superficiales superiores a las deseadas [14].

2.2 Bio-acumulación y biosorción

Tras haber enumerado varios de los procesos de tratamientos de aguas, surge la idea de la utilización de los dos procesos del título, la bio-acumulación y la biosorción, dos caminos dentro de la biotecnología, que a continuación se procede a definir y explicar [15].

La bio-acumulación se basa en un proceso activo de eliminación de los metales pesados utilizando biomasa viva y la biosorción se trata del mismo proceso, pero con biomasa no viva. De estos dos procesos, la biosorción presenta más ventajas y por ello, este proceso es en el que se basa la planta piloto a escala de laboratorio que se construirá.

Como ya he explicado anteriormente, existen la bio-acumulación y la biosorción y a continuación se van a presentar diferentes ventajas y desventajas que muestra cada uno [16].

| BIOSORCIÓN | BIO-ACUMULACIÓN |
|--|--|
| Metales se adhieren a la pared celular | Metales se adhieren a la pared celular e interior de la célula |
| Reversible | Parcialmente reversible |
| Mayor velocidad | Menor velocidad |
| No implica crecimiento celular | Implica crecimiento celular |
| Se podrían reutilizar los contaminantes mediante desorción | No se pueden reutilizar contaminantes |
| Se pueden realizar varios ciclos de adsorción con la misma biomasa | Biomasa de un único uso |

Tabla 2-1. Ventajas y desventajas de la bio-acumulación y la biosorción.

La biosorción, por tanto, ocurre con biomasa no viva que le permite concentrarse y conseguir de esa manera adherir contaminantes a su estructura celular. Especificando un tipo de contaminante de gran interés como son los metales pesados, acumula los metales presentes en las aguas residuales a través de vías de adsorción por dos métodos, que serían metabólicamente o fisicoquímicamente.

Los principales puntos positivos, además de los que se pueden ver en la Tabla 2-1, que ofrecen los biosorbentes son su bajo precio ya que se encuentran de manera sencilla en la naturaleza y que además no tienen costes de remediación. Además, la transformación en elemento biosorbente no es costoso y se realiza de manera sencilla.

Las aguas que se buscan manipular con este tratamiento son las aguas que presentan metales en su composición, y de estos metales pesados, los que principalmente se encuentran en las aguas residuales siguen la siguiente clasificación. Esta clasificación se realiza según su impacto medioambiental:

- Metales pesados tóxicos: son aproximadamente cuarenta y se caracterizan por su elevado peso atómico. Son metales pesados algunos como el cobre y el mercurio.
- Estratégicos: son minerales procedentes de la fabricación del acero.
- Radionúclidos: un elemento que libera radiación cuando se descompone se vuelve más estable. Estos son muy escasos.

Además, existen muchos tipos de materiales biosorbentes que se pueden utilizar para este proceso citado de adsorción de los metales pesados presentes en aguas residuales. Pueden ser los que se presentan en la Tabla 2-2.

| Tipos de adsorbentes existentes |
|---|
| Carbones activados |
| Biomásas |
| Biopolímeros |
| Otros materiales como modificaciones químicas |

Tabla 2-2. Tipos de adsorbentes.

2.2.1 Factores que afectan al proceso de biosorción.

Si se quiere optimizar el proceso de biosorción hay que tener en cuenta una serie de factores que afectan a su efectividad.

El primer efecto a tener en cuenta es el pH ya que determina la solubilidad y especiación de los iones metálicos. Como segundo efecto a destacar aparece la temperatura que depende directamente del cambio de entalpía. Tras analizar las posibles adsorciones a realizar (sean químicas o físicas) se deduce que la temperatura, debido a los estrechos rangos de energía de los metales pesados, es despreciable [17]. Para finalizar se deben tener dos factores más en cuenta: la posible presencia de otros iones y la fuerza iónica. En el caso de la presencia de otros iones afecta porque estos pueden competir con los iones del metal buscado por los sitios de enlace de los que se dispone. Por último, en el caso de la fuerza iónica, un aumento de la misma provocaría el no funcionamiento del proceso de biosorción [16].

2.2.2 Tipos de biomasa empleados en la biosorción.

La prueba experimental, que se realizará al final del trabajo, consta de realizar el proceso de adsorción dentro de la planta piloto. Se realizará a través de dos adsorbentes, el carbón activo y la espirulina (biomasa).

Los adsorbentes pueden ser de bajo coste y alto coste. Los primeros son materiales recolectados de la naturaleza (como sería el caso de las algas marinas) y por residuos del uso industrial (fermentación del vino y el pan). El segundo grupo son materiales que tras cultivarlos, prepararlos o sintetizarlos para el proceso de biosorción se usan para la misma. [18].

Durante el paso de los años numerosos materiales se han analizado para conseguir los más adecuados para la adsorción de metales pesados. Los más estudiados son las bacterias, hongos y algas marinas, pero como ya se indica hay estudios de muchos elementos más como los residuos derivados de la agricultura o el caparazón de los crustáceos [19] [20]. Este trabajo de fin de grado se centrará en el uso de las algas marinas, más concretamente de la *Spirulina Platensis* (espirulina).

Todos los materiales biológicos se caracterizan por la estructura y composición química de su pared celular. La estructura de su pared celular, de gran importancia para su estudio, son la rigidez, la porosidad, la flexibilidad y la dilatación y contracción que sufren por la incorporación de agua durante la biosorción. Por otro lado, fijándose en la composición química esta refleja los grupos químicos que van a afectar a la capacidad del material para remoción de metales pesados [20].

Continuando con el índice elaborado, en los dos siguientes apartados de esta memoria se van a reseñar los tipos de biosorbentes que se utilizarán para la futura prueba de esta planta piloto. La construcción elaborada pretende limpiar agua contaminada con sulfato de cobre por medio de carbón activo y también a través de la espirulina, un alga que se encuentra de manera fácil y abundante en la naturaleza. Este proceso, referido al proceso de adsorción, será explicado en mayor detalle en el desarrollo experimental de esta memoria.

2.3 Proceso de adsorción para depuración de aguas residuales

Expuestas ya las principales características presentes en la bio-acumulación y la biosorción, se centra el tema en la adsorción y posteriormente en la desorción a través de algas y carbón activo.

La adsorción, como en la introducción se exponía, es un fenómeno por el cual un elemento atrae únicamente hacia su superficie todos aquellos elementos contaminantes que se quieren eliminar de otros compuestos. La adsorción es, por tanto, una consecuencia de la energía superficial. Un adsorbente puede atraer adsorbatos debido al enlace que lo caracteriza. Otra definición que puede dejar más claro, lo que se conoce como concepto de adsorción, es que es la tendencia de un componente a concentrarse en la interfase.

En la Figura 2-2 se observa un esquema de lo que sería el proceso de adsorción y como actuarían soluto y adsorbente dentro del mismo.

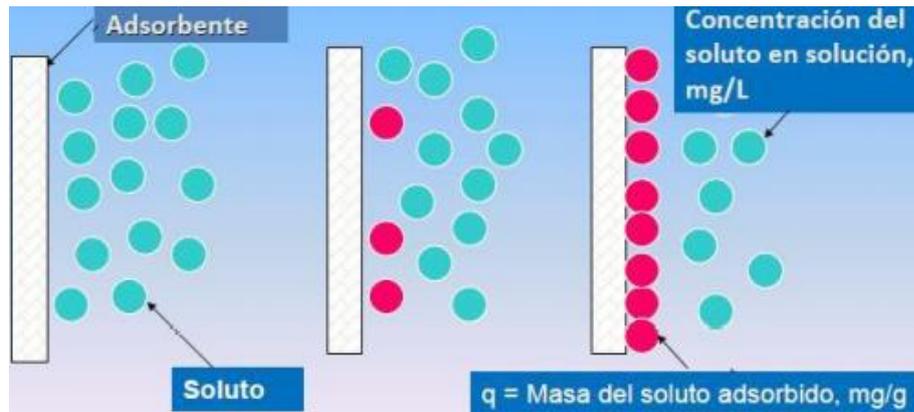


Figura 2-2. Adsorción.

También se señala anteriormente que no es lo mismo adsorción que absorción, pues el primero solo permite la adhesión en sus paredes superficiales y segundo también permite la entrada de contaminante en su interior quedándose adherido en el mismo. Esta diferencia de procesos que se indica queda reflejada, como se puede observar, en la Figura 2-3:



Figura 2-3. Diferencias entre adsorción y absorción (Elaboración propia).

Sin dar por finalizado el concepto general de adsorción y centrando ahora principalmente el tema en la relación existente entre adsorbente y adsorbato, existen tres diferentes modelos de adsorción que se clasifican en químicas, por intercambio y físicas como se representa en la Figura 2-4 [21]

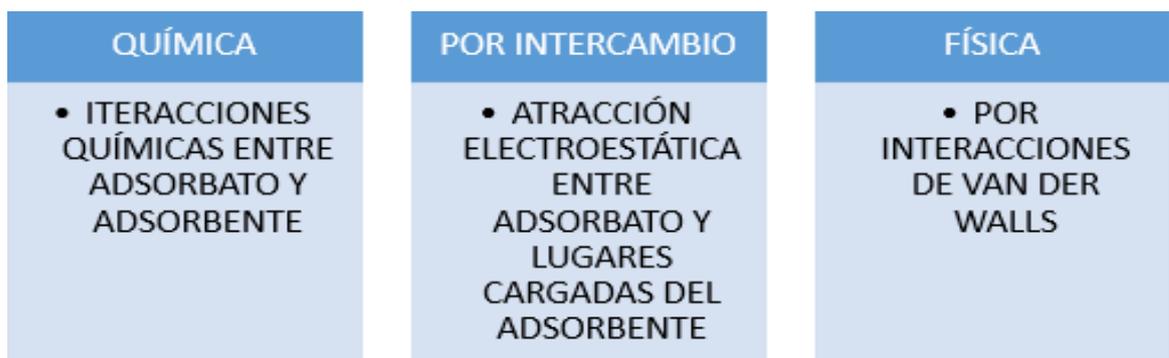


Figura 2-4. Tipos de adsorción en función de su naturaleza.

De estos tipos de fenómenos que se pueden dar en adsorción, es cierto que es difícil encontrar algún adsorbente que no sea combinación de dos de los tres principales.

La capacidad de adsorción estará definida en base a una serie de isothermas de adsorción en disolución. Y la pregunta a responder es qué representa esta isoterma de adsorción. Pues se trata de una relación de dependencia (a temperatura constante) de la cantidad presente de adsorbato adsorbido por el peso unitario adsorbente, con respecto a la concentración de adsorbato en equilibrio.

2.3.1 Adsorción a través de algas.

Tras la introducción anterior, se conoce ya que función tiene la adsorción y cuáles son sus condicionantes para un mejor o peor funcionamiento. Nadie a priori podría imaginarse que un producto como el alga podría servir como adsorbente, pero es realmente sorprendente las excelentes condiciones que pueden llegar a tener estos compuestos [22].

Hasta ahora en investigaciones anteriores, las algas habían dado diferencias evidencias de que podrían funcionar como adsorbentes para el tratamiento de aguas contaminadas, más en concreto, de aquellos medios hídricos contaminados con metales pesados aniónicos como el cromo.

Las algas han despertado un especial interés en las investigaciones y desarrollos de nuevos materiales biosorbentes, debido no solamente a su alta capacidad de adsorción, sino que como ya se menciona se encuentran en mares y océanos de manera abundante y de fácil acceso. A pesar de este interés, aunque sí existen diversos estudios demostrando su efectividad, hay pocos informes en comparación con otros materiales como hongos y bacterias.

La experimentación que se va a realizar en este trabajo de fin de grado, se trata de un alga azul verdosa que como se observa en la bibliografía tiene menos capacidad de adsorción que las algas marrones. Aun así, se realiza la experimentación con esta alga (*Spirulina Platensis*) por pruebas anteriores de las que se disponían.

Como se comenta, el uso de algas marinas tiene una serie de significativas ventajas, la primera de ellas su crecimiento en todos los océanos del planeta de manera natural. Si bien es cierto que la población actual puede ver las algas como un producto feo para el paisaje y pueden llegar a tener mal olor [23].

Otra ventaja primordial es la gran cantidad de algas marinas existentes en la naturaleza que da la posibilidad, cada una con sus especificaciones y diferentes beneficios, de encontrar solución a muchos tipos de materiales a eliminar presentes en el medio hídrico (especialmente metales pesados).

Por último, señalar el alto contenido presente en las algas de alginatos, que es lo que le da ese elemento adsorbente de tan alta utilidad. Destacar que los alginatos son unos polisacáridos aniónicos que se encuentran presentes en las paredes de las algas marinas.

A continuación, en la Figura 2-5, se puede observar esta alga conocida como espirulina en su estado natural.



Figura 2-5. Espirulina en su estado natural [24].

Dentro de todos los productos en los que existe el alginato, destacar que las algas son las únicas en el que el noventa por ciento del trabajo de adsorción las realizan dichos alginatos.

En este trabajo se destaca el uso de las algas en una en concreto, la *Spirulina Platensis* también conocida como *Espirulina*, una microalga que dispone de una gran productividad, ya que además de ser

probada para tareas de adsorción, se usa como suplemento alimenticio. La parte principal es aquella que se indica que se usa como apoyo a la alimentación mientras que el desecho de esta alga es aquel que se utiliza para la adsorción.

En diferentes investigaciones [12] también se fueron probando otras algas como adsorbentes, entre las que destacan *Porphyra umbilicales*, *Puina Joyn Spinosum* o *Torta Spinoserum*. Cada una, como se ha destacado antes, tendrá diferentes propiedades y su utilización se basará en el objetivo buscado.

2.3.1.1 Spirulina Platensis

Fue descubierta a mediados de la década de 1960 por parte de un botánico, Jean Leonard, que durante una expedición la descubrió en un mercado de Chad. Por otro lado, simultáneamente se realizó una solicitud por parte de una empresa de poder realizar un estudio de una floración de algas en unos estanques de la ciudad de México. Fue entonces cuando se realizó una tesis doctoral del crecimiento y la fisiología de la espirulina [25].

Esta alga, perteneciente a la familia del género *Arthrospira*, se trata de una cianobacteria que forma poblaciones masivas en aguas tropicales y subtropicales que se cateterizan por tener altos niveles de carbonato y bicarbonato, además de un pH alto (puede llegar a ser hasta de 11). La *Spirulina Platensis* se encuentra principalmente en África, Asia y América del sur. Existe otra rama de la *Spirulina* que se conoce como *Spirulina maxima* Geitler que su zona de hallazgo está principalmente en Centroamérica [26].

El crecimiento de esta cianobacteria depende también mucho, tanto en cultivos abiertos como cerrados, de las condiciones de cultivo. Entre estas condiciones se incluyen algunas como el pH, la intensidad de la luz, la presencia de contaminantes, fuentes de nitrógeno, etc.

2.3.1.1.1 Composición del alga espirulina

Esta alga está compuesta por un 70% de proteínas. Además posee un contenido considerable de lípidos y un alto contenido de vitaminas (especialmente B12 y β -caroteno); y también una serie de pigmentos como xantofilas o clorofila [27].

En la Tabla 2-3 se puede observar las composiciones estándar del polvo seco de la espirulina:

| Composición | |
|---|----------------|
| Ficocianina (g/kg) | 140 |
| Clorofila (g/kg) | 6,1-10 |
| Carotenoides (g/kg) | 3,7 |
| β-caroteno (g/kg) | 1,5-1,9 |
| Proteínas(%) | 55-70 |
| Humedad(%) | 4-7 |
| Cenizas(%) | 6-13 |

Tabla 2-3. Composiciones estándar del polvo de la espirulina.

2.3.1.1.2 Morfología

Son cianobacterias filamentosas que le caracteriza la principal característica del género: la disposición de tricomas cilíndrico multicelulares en una hélice abierta a la izquierda a lo largo de toda su longitud. En la Figura 2-6 se puede observar esta morfología señalada.

Utilizando microscopía óptica, los filamentos azul verdosos muestran paredes transversales. Los tricomas son finos crecimientos o apéndices de plantas, algas, líquenes y algunas protistas. Son de diversa estructura y función. Algunos ejemplos pueden ser pelos, pelos glandulares, escamas o papilas. En este caso, estos tricomas se muestran ligeramente pronunciados. La estructura de este tipo de organismo es el típico de los organismos procariotas [26] [28].

En relación a factores que puedan afectar a la geometría de la hélice, cabe destacar los ambientales (especialmente la temperatura).



Figura 2-6. Micrografía de luz de *Arthrospira Platensis*.

2.3.2 Adsorción a través de carbón activo.

El carbón es un elemento descubierto hace mucho tiempo atrás, y se pueden destacar muchas y variadas funciones que se le han ido dando. Por ejemplo, ya en la antigua China fue una de las primeras fuentes energéticas en utilizarse para el desarrollo de la vida.

Dentro de la multitud de utilidades que puede tener el carbón, aparece una relacionada con la limpieza de aguas residuales, y es a través de una forma específica en la que se puede convertir el carbón, conocida como el carbón activo.

Carbón activo o carbón activado es un término que se utiliza para describir una familia de adsorbentes carbonáceos que disponen de una cristalinidad elevada [29].

Inicialmente, se ha de proceder a explicar cómo se obtiene este carbón. Para su obtención existen una amplia cantidad de materiales orgánicos presentes en la naturaleza que se pueden usar como serían la hulla, el carbón vegetal, la caña de azúcar y una variada cantidad de productos más. Según la zona, el método de obtención será diferente por facilidades ofrecidas y menores costos económicos [30]. También de su manera de obtenerse, el carbón activo tendrá ciertas propiedades que serán de diferentes utilidades para el saneamiento de aguas. Destacar que su origen puede ser vegetal, de mineral lignítico, de mineral bituminoso y de concha de coco. Cada uno de ellos ofrece variadas aplicaciones.

El carbón activo vegetal sirve para el tratamiento de aguas residuales con alto contenido de materia orgánica y elevadas cantidades de grasas. El procedente de mineral lignítico es de utilidad para una elevada cantidad de aguas residuales mientras que el bituminoso es para aguas superficiales y con moléculas de peso intermedio. Por último, el carbón obtenido a través de concha de coco elimina de manera eficaz olores y sabores y tiene facilidad también para la eliminación de materiales volátiles.

Después de destacar los tipos de carbón activo según su origen, indicar también que existen diferentes tipos de carbón activo según el proceso al que son sometidos y estos son los siguientes [30]:

- Carbón activado en polvo (PAC²): polvo fino negro que es utilizado para medicamentos principalmente.

² Powdered Activated Carbon

- Carbón activado granular (GAC³): son granos de mayor tamaño que los del carbón activo en polvo (hasta dos milímetros) y su función más común es su utilización como filtros de agua o como tratamientos de agua. En este proyecto, serán de mayor importancia los GAC pues son importantes para el trabajo, centrado en la construcción de una planta piloto que pueda tratar aguas residuales.

Dentro del carbón activo, existe una amplia gama de productos, que ofrecen diferentes y variadas características. Y para saber cómo producir diferentes modelos de carbón activado, hay que centrarse en el material de partida (ya expuesto en párrafos anteriores) y la técnica de activación que se usa para su elaboración.

La activación que se señala para la producción del carbón activo se suele dar por dos métodos claramente diferenciados:

- Método químico: en este caso se trata de mezclar la materia prima (el carbón) con una sustancia como podría ser un ácido, y someterlo a unas temperaturas establecidas anteriormente. El problema que tiene este método es que puede dejar residuos en el producto final obtenido y además no es un proceso reversible.
- Método físico: es un proceso que consiste en usar el material carbonizado con una mezcla de gases y vapor de agua. Es la más común debido a una serie de problemas que puede causar la química.

El carbón activo tiene una serie de características que le hacen un elemento muy útil para la adsorción. Y la principal es la gran superficie que ocupan para la poca masa que tienen. Esto es principalmente por la porosidad, que suele ser producida por las altas temperaturas utilizadas en el proceso.

Este elemento que se trata suele adsorber por el método de fuerzas de Van der Waals (Figura 2-4) que básicamente consiste en que cuanto más superficie tenga el adsorbente a utilizar, mayor será esa capacidad de adsorción que tiene.

Se ve por tanto que esa porosidad de la que se habla es vital para el correcto funcionamiento del carbón y se pueden reseñar diferentes clasificaciones de esos poros [31]:

| SEGÚN SU TAMAÑO | SEGÚN SU FUNCIÓN |
|---|------------------|
| MACROPOROS (mayores de 50 nm de diámetro) | DE ADSORCIÓN |
| MESOPOROS (entre 2 y 50 nm) | DE TRANSPORTE |
| MICROPOROS (menores de 2 nm) | - |

Tabla 2-4. Clasificación de los poros.

Los poros pueden tener varias clasificaciones, dos de ellas como se puede ver en la Tabla 2-4, son la clasificación de los poros según su tamaño y según su función. Según su función existen de adsorción y de transporte. Los de adsorción son los únicos que tienen suficiente fuerza para adsorber impurezas. Todos esos poros se llenarán con moléculas absorbidas a condiciones cercanas a la saturación. Los de transporte por otro lado son de mayor tamaño, pero solo ejercen atracción en el adsorbato y por tanto no retienen con firmeza los contaminantes.

³ Granular Activated Carbon

2.3.2.1 Propiedades que afectan a la adsorción del carbón activo

Existen varias situaciones que dan mejores o peores propiedades al proceso de adsorción [32]:

- Propiedades relacionadas con el tipo de carbón activado: la adsorción aumenta si los poros son entre una y cinco veces el diámetro del adsorbato y además las diferencias entre superficie y constituyentes de cenizas puede afectar a la adsorción.
- Propiedades relacionadas con el adsorbato: Todas las moléculas orgánicas se absorben bien en el carbón activo pero las inorgánicas sí que dependen de las propiedades del adsorbato. Se basa en varias características como que a mayor peso molecular la adsorción es más fuerte. También afectan los tipos de moléculas a adsorber según sea orgánicas o inorgánicas.
- Propiedades relacionadas con el líquido que rodea el carbón activo: aquí influye el pH, que cuando disminuye aumenta la adsorción. Aquí se debe destacar también que la temperatura no hace variar el proceso.

2.3.2.2 Efecto producido por la forma del carbón activo en la adsorción

Existen tres tipos de formas principales [33]:

- Granular: Se trata de granos irregulares de carbón activo que se suelen introducir en gases. Existe una amplia gama de tamaños y se busca un tamaño que consiga no aumentar la presión del compuesto.
- En polvo: es lo que se definiría como el caso extremo del tipo granular. Se suele utilizar para líquido, no siendo válido para gases. El tamaño es menor que el de granular, pero la superficie, básica para una buena adsorción, es mucho mayor.
- Pelletizado: se usan una serie de agentes ligantes como la glucosa y dan lugar a formas cilíndricas proporcionando seguridad en procesos donde la intención es no perder partículas.

En el caso del asunto del proyecto, se utilizará el polvo para posteriormente construir las bolas de alginato utilizado como adsorbente.

3 DESARROLLO DEL TFG

3.1 Metodología

Tras los puntos anteriores, este epígrafe consta de la explicación del desarrollo del proceso de diseño y construcción, y el de experimentación e irán tratando diferentes aspectos en el siguiente orden:

3.1.1 Procedimiento

A continuación, en la Figura 3-1, se observa un diagrama de flujo donde se explica de manera clara el proceso de selección del diseño, construcción y experimentación posterior:

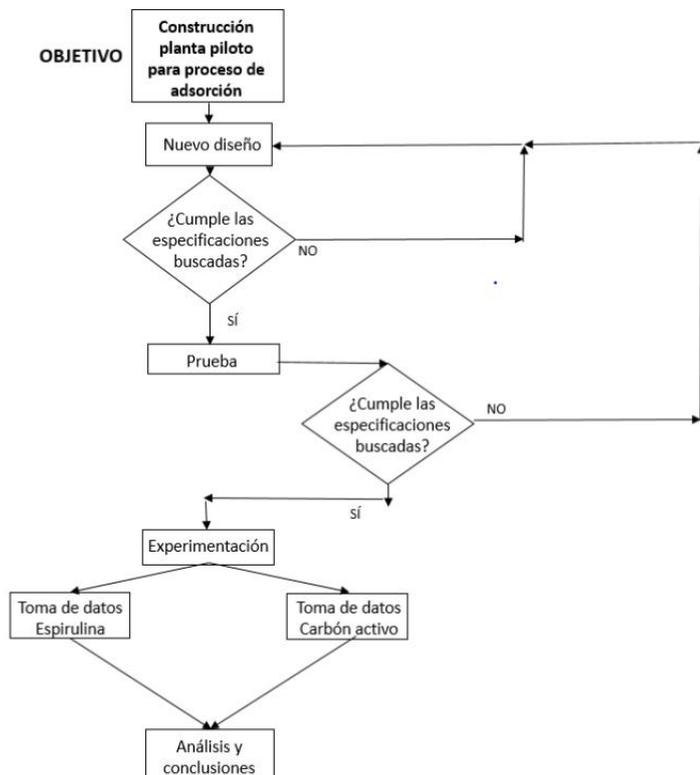


Figura 3-1. Metodología seguida para el trabajo fin de grado.

Por tanto, observando la metodología seguida para el trabajo de fin de grado, el principal objetivo es la construcción de una planta piloto a escala de laboratorio que siga un flujo cíclico. Dentro de la misma, se intentará mediante un proceso de adsorción con adsorbentes de bajo coste, realizar el tratamiento de aguas residuales.

Se comienza pensando cuál puede ser el diseño óptimo para esta planta piloto y elegir uno, se pasa al punto en el que se debe responder a la pregunta de si se cumplen los requerimientos que se están buscando para este trabajo. Si no funcionan, se descarta este diseño y se comienza uno nuevo. Esta etapa finaliza cuando se consigue un diseño que cumpla los requerimientos.

Una vez el diseño preparado ha cumplido las especificaciones buscadas, se pasa al punto de construirla a escala de laboratorio para posteriormente poder realizar una fase de experimentación.

Ya se ha llegado al momento de probar en el laboratorio de manera experimental si el prototipo que se ha diseñado funciona y esto se divide en dos pasos. Estas dos fases serán las pruebas realizadas con espirulina y su toma de datos durante el proceso preparado y el mismo proceso, pero con el carbón activo.

Finalmente, una vez alcanzado el punto final, se debe buscar conseguir sacar un análisis productivo y una serie de conclusiones para de esta manera explicar el motivo del trabajo y por supuesto, si los resultados son satisfactorios o no.

3.1.2 Materiales y reactivos utilizados en la experimentación

Los materiales principales necesarios para este trabajo se exponen en el punto 3.1.2.1. El resto de materiales no mencionados son elementos secundarios, necesarios para completar la construcción de la planta piloto y se irán viendo en los siguientes epígrafes.

Para la fase experimental, se requerirá de los reactivos mencionados en el punto 3.1.2.2 y también del material de laboratorio necesario para su preparación y elaboración.

Como se indica, en el punto 3.1.2.1 solo se explican los que se consideran materiales fundamentales, es decir, materiales para la construcción como el tanque y el tubo no se explican ya que posteriormente en el desarrollo del trabajo se podrá observar para qué y cómo se utiliza cada uno de ellos.

3.1.2.1 Materiales

- Medidor de pH y conductividad: durante la toma de datos se utilizará este medidor para obtener los datos mencionados. El utilizado en este trabajo es el que se aprecia en la Figura 3-2.

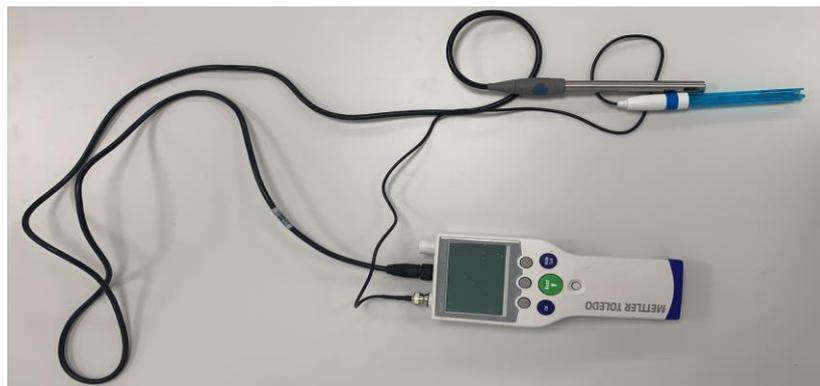


Figura 3-2. Medidor de pH y conductividad.

- Espectrofotómetro Spekol 1500: se utilizó para la realización de la recta de calibrado de las disoluciones elaboradas y para tomar las muestras de adsorbancia ofrecidas tanto por la espirulina como por el carbón activo. Posteriormente, en la toma de datos y experimentación se explicará de manera rápida y sencilla el funcionamiento de esta máquina y para qué se utiliza en todo momento. En la Figura 3-3 se observa el modelo utilizado.



Figura 3-3. Espectrofotómetro.

- Columnas de adsorción: como no se disponen de columnas de adsorción se utilizarán dos extractores Soxhlet para la elaboración del diseño (podrían ser más y se explicará por qué en la parte del diseño). En estas columnas se colocará posteriormente el adsorbente de bajo coste como medio para el tratamiento de las aguas.
- Válvula de tres vías: utilizada para división de caudales y para posibilidad de ofrecer distintas salidas. Esta válvula mencionada es la de la Figura 3-4.



Figura 3-4. Válvula de tres vías.

- Bomba: se encontrará situada dentro del tanque y se utilizará para desde el mismo transportar al agua pues tiene que subir una altura determinada y no sería posible sin la bomba. Por tanto, como característica principal de la bomba, se busca que sea capaz de proporcionar la potencia suficiente. Las especificaciones que tiene esta bomba (Figura 3-5) son:
 - 16 vatios.
 - 1,6 metros de altura máxima.
 - CC: 220-240 voltios.
 - Máximo flujo: 800 litros por hora.



Figura 3-5. Bomba sumergible.

3.1.2.2 Reactivos

Dentro de este apartado de la memoria, hay que destacar los diferentes reactivos utilizados tanto para elaborar disoluciones, como aquellos utilizados como adsorbentes y también los necesarios como complementarios para la toma de datos o cualquier otro proceso de la experimentación:

- Adsorbatos
 - Sulfato de cobre
- Adsorbentes
 - Carbón activo polvo
 - Arthtosphira Platensis (espirulina)
- Elementos utilizados para la experimentación
 - Sodio Alginato
 - Cloruro cálcico
 - Amoniacó
 - Agua destilada (medio utilizados para preparación de las disoluciones necesarias)

3.1.3 Diseño y construcción de la planta piloto

Comienza el proceso de buscar el mejor tipo de planta piloto para la realización de la experimentación posterior. Para ello se deben establecer una serie de requisitos que cumpla la planta que si son correctos permite avanzar en el diagrama de flujo elaborado como se muestra en la Figura 3-1.

Se busca conseguir que el agua contaminada pase de alguna manera por diferentes adsorbentes de manera que se consigan limpiar dichas aguas y que la facilidad de cambio o mezcla con diferentes productos sea lo más rápida y sencilla posible.

Elegir los materiales que se van a utilizar para la construcción del sistema es importante de manera que nos faciliten el establecimiento de los requerimientos necesarios.

A continuación, se procede a realizar una recopilación de diferentes variables que pueden hacer variar el funcionamiento de la planta piloto que se quiere construir, pues en determinadas condiciones producirían cambios en su diseño. En concreto, para este trabajo de fin de grado las variables que por su influencia se deben destacar son:

- Tipo de contaminante y su concentración en el agua: afecta sobre todo a la fase posterior de experimentación.
- Temperatura y propiedades del agua: se van a utilizar elementos de medición y para ello estos factores deben ser de obligado conocimiento.

- Longitud y altura del circuito: influyen de manera importante, por lo que se debe buscar la manera de hacerlos fijos en el diseño, para que en la posterior construcción no generen problemas ni cambios significativos.
- Caudal disponible y utilizado en experimentación: depende de la bomba que se utilice. Aquí se explica en el punto de materiales anterior cual se utiliza.
- Potencia de la bomba utilizada: directamente relacionada con el punto anterior.
- Tiempo que el agua está expuesta a los adsorbentes de bajo coste pues estos deberían cambiar sus propiedades.

Dentro de estas variables expuestas, existirán varias que se establecen constantes y otras que se pueden ir variando para conseguir cambios en la experimentación.

Los factores que se mantendrán constantes serán los relacionados directamente con el diseño del circuito como son la altura máxima del circuito, la longitud y diseño del mismo y por supuesto, el rozamiento que tendrá el agua pasando por los diferentes elementos que tiene el circuito que se mantendrá constante si los dos puntos anteriores se establecen como un dato estable.

Las variables que se podrán ir modificando están más relacionadas con las disoluciones y tipos de adsorbentes que se utilizan, es decir con los que es el funcionamiento de las diferentes reacciones que se darían entre adsorbente y adsorbato, como podrían ser, concentración de contaminante, temperatura (importante para mediciones de pH y conductividad), propiedades del agua y el tipo de contaminante usado.

Por último, existen unas variables que dependen del material disponible. En función de la bomba que se disponga existirá un caudal u otro que variaría el régimen del flujo cíclico que se quiere obtener. También, es diferente en función del tipo de tubo utilizado, ya que se podría facilitar o dificultar más el tránsito del agua a través del sistema, ya que cada tubo tiene unas características propias.

Una vez ya se han definido todos los tipos de variables existentes en el trabajo, se pueden determinar los requerimientos o especificaciones que el diseño debe cumplir para funcionar de manera correcta.

Como requerimiento principal, el objetivo de este trabajo es la construcción de una planta piloto, aplicando adsorbentes de bajo coste, conseguir un régimen de flujo cíclico semicontinuo del medio hídrico (serán aguas contaminadas), pues tras el proyecto realizado por el alférez de navío Paz Armada ya se sabe que los adsorbentes de bajo coste probados tenían resultados satisfactorios a la hora de funcionar como limpiadores de metales pesados como en este caso (que se utiliza sulfato de cobre).

Por tanto, los requerimientos o especificaciones principales buscados serán:

- Funcionar en un régimen cíclico con un caudal que se mantenga constante. El sistema permite funcionar con diferentes caudales gracias a la utilización de grifos de tres vías y la posibilidad de colocar más de una bomba sumergible.
- Capacidad para intercambiar diferentes tipos de adsorbentes utilizados para el tratamiento de las aguas residuales.
- Facilidad para la toma de datos del sistema como conductividad, pH y muestras para posteriormente medir la adsorción. Estos serían los puntos de toma de datos o mediciones.
- Posibilidad de cambiar el contaminante a tratar sin tener que desmontar el posible diseño elaborado. Más concretamente, referido a la facilidad ofrecida por el diseño para diferentes cambios que se quieran ir realizando. Este punto se podría definir como la versatilidad que ofrece el diseño para variar según nuestro interés.

3.1.3.1 Primer diseño

Tras haber establecido las especificaciones que se quieren cumplir, comienza el proceso de diseño de la planta buscando aquel que satisfaga todas las principales especificaciones, pues son básicas para el correcto funcionamiento.

Se podría haber guiado el trabajo por un camino en el que sólo se utilizase un adsorbente pero la intención era buscar una manera que hiciese posible pasar el agua contaminada por varias columnas y que en ellas se pudiesen situar diferentes adsorbentes (incluso mezclando varios de ellos) y poder cambiarlos con facilidad.

El diseño inicial que se elaboró, está representado en la siguiente figura:

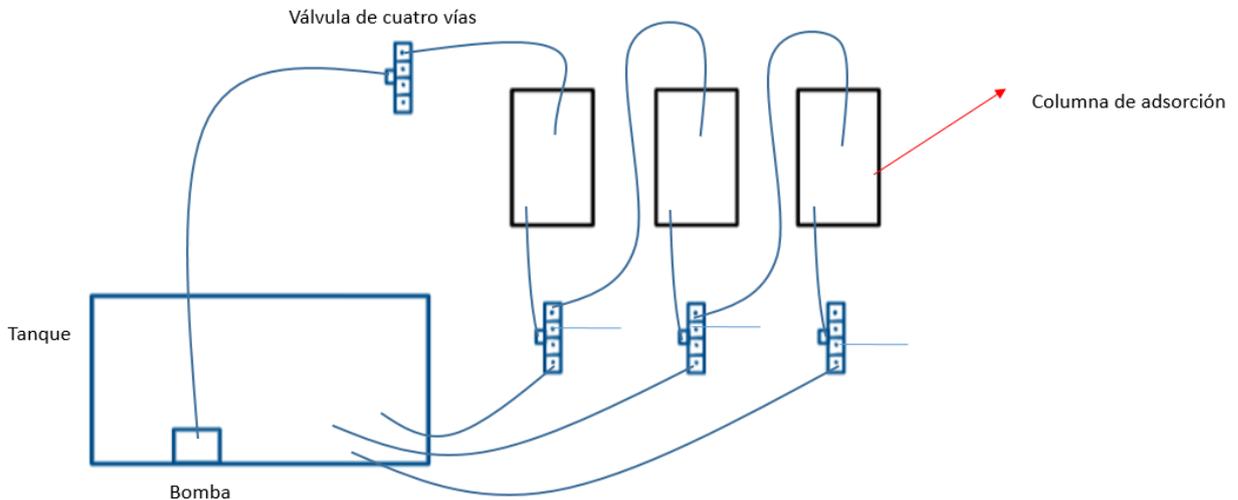


Figura 3-6. Diseño inicial.

Pero este diseño tenía un problema principal y era la necesidad de un sistema muy grande pues cada vez que salía de una de las columnas de adsorción la presión hidrostática generada por la bomba se perdía y entonces hubiesen sido necesarias varias bombas.

Para la recirculación de esa agua contaminada tras su paso por los adsorbentes, existen varios caminos para retornar al tanque. Además, se puede establecer que solo pase por una columna o por varias. Por último, se observa a la salida de cada columna, existe un tubo que se puede utilizar para toma de datos.

La intención principal de este diseño era cumplir los requerimientos, pero su complejidad y su elevada necesidad de material lo complicaba.

Por otro lado, otro problema presente en este diseño no era otro que la necesidad de mayor cantidad de tubo le hacía a la planta ocupar mucho más espacio, como se puede observar en la Figura 3-6. Es importante recordar, que este trabajo al final busca una posible instalación para barcos como línea futura, cuyo espacio es limitado y buscar una opción que ocupe lo mínimo posible sería siempre lo más adecuado.

Por último, tras varias pruebas se podía comprobar que las válvulas de tres vías o incluso alguna de cuatro vías que se hubiese necesitado le provocaba una disminución de caudal considerable por lo que, directamente relacionado, se habrían requerido bombas sumergibles mucho más potentes y, por tanto, económicamente más inaccesibles.

3.1.3.2 Segundo diseño

Se sigue buscando cumplir los requerimientos expuestos, buscando en este caso solucionar los problemas presentes en el diseño inicial. Se sigue queriendo un diseño que ocupe el menor tamaño posible y que permita trabajar con diferentes adsorbentes siendo fácilmente intercambiables.

Se opta ahora por una nueva colocación de las columnas de adsorción que simplifica el proceso y evita el problema de la necesidad de bombas a la salida de cada columna. Para conseguir esto se colocan

las columnas de manera vertical consiguiendo de tal manera que, en lugar de ir unidas las columnas a través de tubos, se produce dicha unión por la caída del contenido, no necesitando de tal manera más que una bomba para la planta.

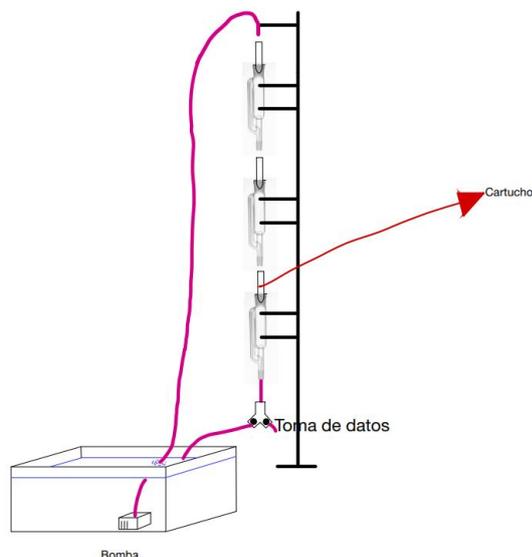


Figura 3-7. Segundo diseño.

Dicha bomba mencionada en el párrafo anterior, será la necesaria para conseguir llevar el agua contaminada a la primera columna de adsorción que es la que se encuentra más arriba, a una altura máxima determinada que se pretende sea constante.

Este diseño disminuye la necesidad de material y también el tamaño, haciendo factible la primera prueba de funcionamiento, no del proceso de adsorción sino del funcionamiento del sistema, es decir, conseguir que el agua circule por el sistema sin desbordar.

Tras alcanzar todos estos requerimientos señalados, el segundo diseño es el que se observa en la Figura 3-7

Para ello, ahora se procede a comenzar lo que recibe el nombre de prueba número uno comprobando así su funcionamiento.

3.1.3.3 Primera prueba

Esta primera prueba no se realizará con el agua contaminada, sino únicamente con agua destilada para comprobar que circula sin ningún tipo de problema.

Por ello, tras comprobar que el segundo diseño puede ser válido para la construcción posterior, se debe pensar en cómo colocar los adsorbentes de la manera más sencilla posible para su intercambio y además para que sea útil a la hora de realizar esa limpieza de aguas contaminadas.

Se piensa en la colocación de cartuchos en la parte superior de cada columna, como se puede observar en la Figura 3-8 y dentro de ellos colocar el adsorbente de bajo coste para que a través de ellos pase esa agua a tratar, cayendo después a través de las columnas llegando finalmente al tanque inicial, donde se podrá realizar la toma de datos.

Para conseguir colocar cada cartucho en la parte superior de cada columna la idea es utilizar un pequeño alambre que lo atravesase manteniéndolo en la parte superior y además facilitando su cambio posterior. Estos cartuchos se observan en la siguiente figura:

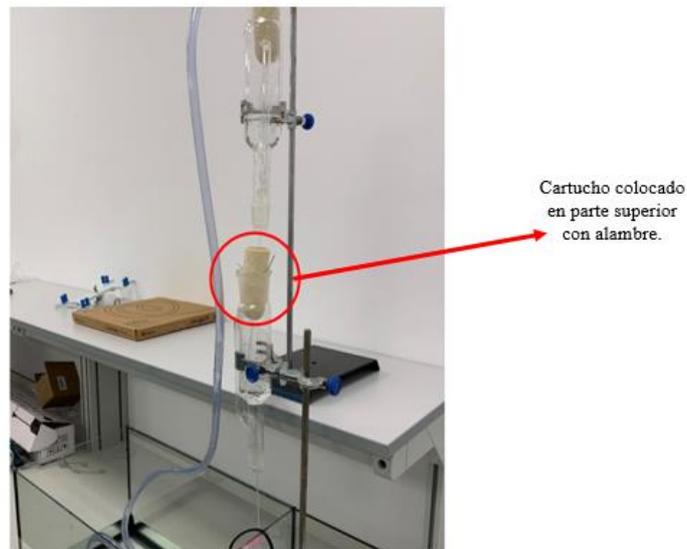


Figura 3-8. Cartucho utilizado para el segundo diseño

Se realiza la prueba y aparece un problema que no permite su utilización. Y no es otro que debido a los materiales empleados (espirulina y carbón activo) y al colocarlos dentro del cartucho del que se dispone, sus propiedades moleculares y estructurales no permiten el correcto paso del agua y, por tanto, esta se desborda no siguiendo el circuito propuesto y no siendo de utilidad.

Este segundo diseño cumplía ya la especificación de que la bomba tuviese una potencia suficiente pero ahora debía buscar uno nuevo que además cumpliera el de poder utilizar ese adsorbente de alguna manera que permitiera el correcto paso del agua y también, por tanto, el conseguir realizar ese tratamiento de ese medio hídrico contaminado sin que este se saliese del flujo cíclico que se pretendía obtener.

3.1.3.4 Tercer diseño

Se termina la primera prueba sin éxito y se inicia por necesidad la búsqueda de un nuevo diseño, pero ya centrado en el cambio de la colocación del adsorbente, pues el resto del croquis parece que a priori funciona de manera correcta, cumpliendo gran parte de las especificaciones.

Se piensa de manera inicial en colocar el adsorbente de alguna forma dentro de un papel de filtro y éste a su vez conseguir depositarlo dentro de la columna. Cuando se va a proceder es cuando aparece la opción de usar el adsorbente inmovilizado a través de su mezcla con alginato sódico y una disolución de cloruro cálcico.

Estas bolas deberían poder funcionar como adsorbente y lo que es más importante, deberían permitir cumplir las especificaciones del diseño, ya que no se producía ningún cambio en el resto del diseño, y el agua avanzaba en flujo cíclico sin desbordar ni salirse del sistema preparado.

En todos los diseños elaborados también se tuvo en cuenta que el flujo de salida no fuese muy superior al de entrada para que no se diese la situación en la que el tanque rebose. Al estar colocado lo utilizado como columnas de adsorción de manera vertical ese problema no está presente, pues la salida de la última columna precipita directamente en el tanque inicial y, por tanto, todo el líquido sale y entra desde el mismo tanque.

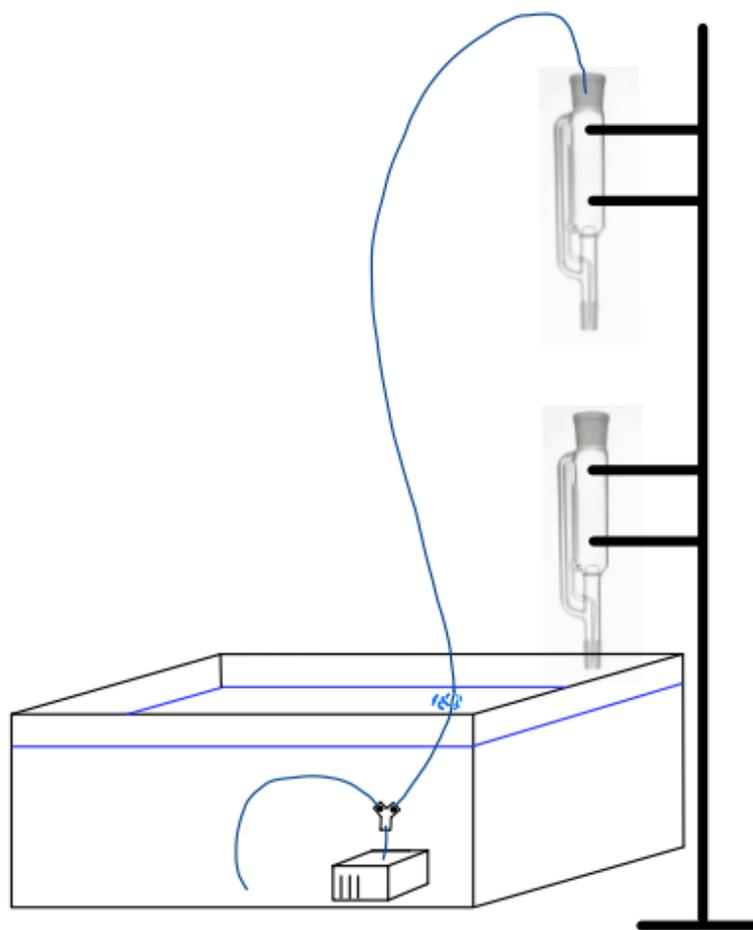


Figura 3-9. Diseño definitivo utilizado para la construcción de la planta piloto.

3.1.3.5 Segunda prueba

Con el conocimiento de una nueva opción para solucionar el problema, se elabora el tercer boceto y se procede a la prueba del mismo. Cabe recordar que, en el primer ensayo realizado para el segundo diseño, el principal inconveniente era la posibilidad de paso de agua a través de cartuchos con adsorbentes sin sobresalir el agua y con un caudal suficiente, pues bajando el caudal se podría conseguir, pero en este caso sería a unos valores tan bajos que pierde su efectividad.

Ya se cumplían todos los requisitos a priori excepto el mencionado y para ello aparece la idea de las esferas de alginato citado en el Tercer diseño.

Una vez elaboradas esas esferas de alginato, se realiza el ensayo y se observa que ahora sí se cumplen las especificaciones buscadas. Se consigue un caudal que sí que es válido y, en consecuencia, un diseño que será apto para la construcción posterior.

3.1.3.6 Construcción

Siguiendo el diagrama de flujo elaborado en la Figura 3-1, se observa que tras el proceso de su diseño y habiendo cumplido ya los requerimientos del mismo, se puede proceder a la construcción de la planta piloto.

Se utilizará como tanque del medio hídrico contaminado, las peceras reseñadas en Materiales que tienen una capacidad de 38 litros, aunque en principio para la experimentación se pensó en un máximo de preparación de disoluciones de 10 litros.



Figura 3-10. Pecera utilizada como tanque del medio hídrico.

Posteriormente, para funcionar como esas columnas de adsorción se utilizan las que se pueden ver en la siguiente Figura 3-11, que fueron encontradas en el laboratorio de química utilizadas en diferentes prácticas de asignatura del grado.

Lo que rodea a la columna de adsorción es la pinza que a su vez va unida al soporte de laboratorio permitiendo conseguir su colocación de manera vertical.



Figura 3-11. Extractor Soxhlet usado como columna de adsorción

En relación a la bomba, la que se utiliza para el sistema final es la expuesta en Materiales. Los tanques presentes en el CUD⁴ disponían de bombas con filtro para su utilización pero durante una de las pruebas se vio que no ofrecían suficiente caudal y no permitían la subida del agua a la altura máxima del sistema. Además de esas bombas, antes se pensó en otros tipos de bombas no sumergibles, pero finalmente esta opción fue la que más convenció para su funcionamiento. Por tanto, se procedió a encargar esas bombas. La ventaja que ofrece este diseño es que si se fuese necesaria más potencia se podría poner varias bombas en paralelo consiguiendo aumentar el cual o por supuesto, adquirir bombas con más potencia.

Esas bombas, por tanto, ofrecían el caudal necesario o incluso ofrecía caudal de sobra y eso obligó a la colocación de una válvula que dividiese el caudal. Una de las salidas de dicha válvula se dirige al inicio del proceso de adsorción y la otra salida vuelve al propio tanque pudiendo utilizarse esta para toma de datos o incluso para remover el mismo, evitando de tal manera que posibles sólidos se acumulasen en el fondo y no participasen en esa recirculación de agua a través de los adsorbentes.

En caso de necesitar más caudal, siempre se podrá colocar más de una bomba como se menciona permitiendo llegar a mayores alturas o aumentando la velocidad del tratamiento, ya que el agua

⁴ Centro Universitario de la Defensa

contaminada pasaría más por el flujo cíclico de las columnas de adsorción donde se encuentran colocadas las bolas de adsorbente inmovilizado.



Figura 3-12. Salida del medio hídrico a través de la bomba y posterior división en dos salidas gracias a válvula de tres vías.

La altura máxima del sistema construido es de 78 cm y el caudal de la bomba utilizada satisface esta necesidad. Por lo tanto, se consigue alcanzar otro objetivo más de la construcción de la planta piloto.

El siguiente aspecto a tratar será el tipo de tubos a utilizar para conectar todos los elementos del sistema son los tubos a utilizar para interconectar el sistema. Para elegir el tamaño y grosor de dichos tubos, solo había una condición obligatoria y no era otra que la necesidad de un tubo superior a 8 milímetros para la salida de la bomba.

Gracias a que no había muchos condicionantes, se eligió uno igual para toda la construcción y este era uno de espirocristal con un diámetro de 8 milímetros. Las características principales de este material son:

- Gran flexibilidad.
- Buena resistencia química.
- Temperaturas recomendadas dentro de la escala de temperaturas en la que se trabaja con el medio hídrico contaminado.
- Dispone de una muy buena resistencia a rotura por alargamiento.



Figura 3-13. Tubo de espirocristal utilizado en el diseño.

Por tanto, ya se dispone de todos los elementos necesarios para la construcción de la planta piloto en la que posteriormente se realizará un proceso de experimentación, con su correspondiente toma de datos que permita comprobar el funcionamiento de los adsorbentes.

Como materiales auxiliares para la construcción de la planta piloto se utilizan: pinzas, bridas o alambres que se aprecian en alguna de las figuras expuestas. Sirven principalmente para realizar agarres de los elementos principales del diseño como lo utilizado como columnas de adsorción o tubos.

La necesidad de estos elementos señalados se debe principalmente a que la presión del agua en el paso por los tubos podría forzar descontrol y desbordar el agua contaminada, no permitiendo así que se cumpla el flujo cíclico del sistema.

La construcción definitiva se hará con dos extractores Soxhlet, pero para líneas futuras se podría hacer con más según la necesidad del tratamiento. Además, los extractores como se menciona no son para esta función, pero existen diferentes diseños de columnas de adsorción que podrían utilizarse para la planta piloto.

Por otro lado, las esferas introducidas en cada una de las columnas pueden ser mezcladas o ser del mismo tipo de adsorbente. Eso ofrece la posibilidad de trabajar con muchas variables según las necesidades de tratamiento que pueda tener el medio hídrico. Estas variables serán principalmente las producidas por el tipo de contaminante predominante presente en la composición del agua a tratar.

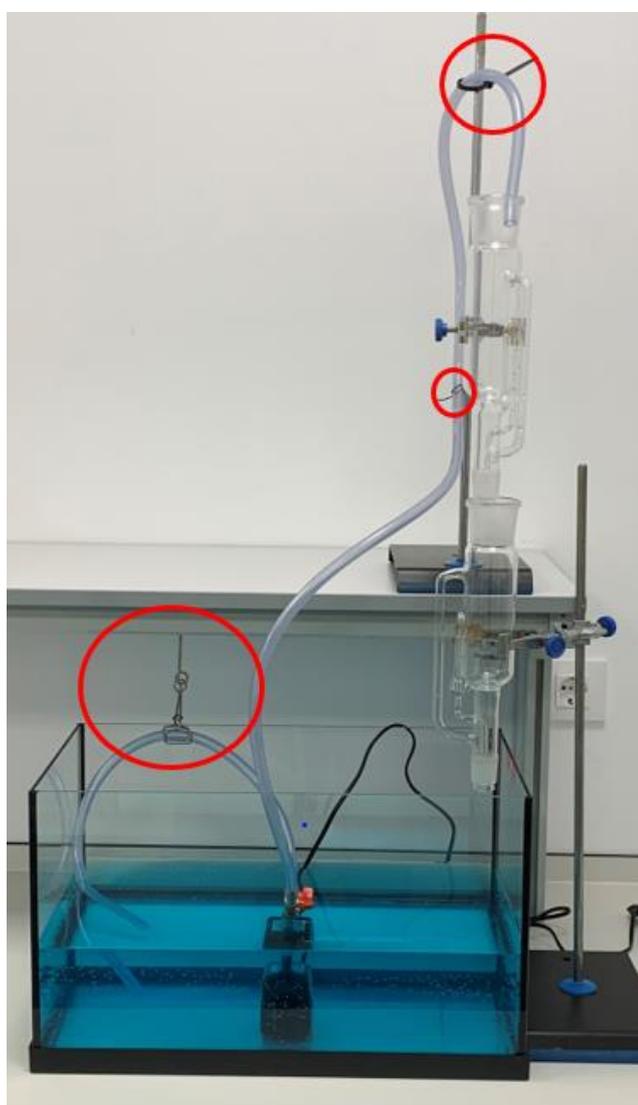


Figura 3-14. Construcción de planta piloto para utilización de adsorbentes de bajo coste.

Los tres círculos rojos que se pueden observar en la figura anterior señalan las pinzas y bridas que funcionan como elementos auxiliares para facilitar el buen funcionamiento del sistema. También se observa que el agua tiene un tono azulado y eso se debe a que se encuentra disuelto dentro de ella el

contaminante que se va a utilizar para la experimentación, tratándose en este caso de sulfato de cobre con una concentración de 5 gramos por litro de agua destilada.

En relación al resto del montaje y su funcionamiento, explicar que a través de la bomba subiría el agua contaminada, circulando hasta llegar la columna de adsorción superior; ahí entraría en contacto con el adsorbente y caería hasta llegar a la segunda columna donde se realizará el mismo proceso que en la anterior. Finalmente, el agua vuelve a caer al tanque inicial comenzando de nuevo el proceso.

De este modo, se consigue la planta piloto que se buscaba como uno de los objetivos del trabajo fin de grado y sólo faltaría proceder a la fase de experimentación, en la cual se probará el funcionamiento de los adsorbentes y si los que se van a utilizar son realmente efectivos para el tratamiento de aguas contaminadas.

3.2 Desarrollo experimental

En este epígrafe, tras realizar la parte principal del trabajo basada en la construcción de un sistema de adsorción a escala de laboratorio, se procede a elaborar una parte experimental que busca comprobar el funcionamiento para tratamiento de aguas contaminadas.

Este desarrollo experimental se trata solo de un primer paso para comprobar su correcto funcionamiento. Tras realizarse podría servir como guía para futuras investigaciones que ofrezcan resultados más amplios.

3.2.1 Metodología empleada en la experimentación

En los siguientes apartados se profundizará en cuales han sido los pasos a seguir para poder desarrollar la fase experimental en la planta piloto diseñada y construida. Para el agua contaminada que se va utilizar en la experimentación será una que contenga sulfato de cobre (II) (CuSO_4). La concentración de contaminante que habrá presente será de 5 gramos de sulfato de cobre por cada litro de agua destilada. Se prepararon disoluciones de 10 litros para el proceso de experimentación.

En cuanto al porqué de la elección de este contaminante es debido a la facilidad del método colorimétrico para la toma de datos y a la posibilidad que se tenía de comparar los resultados obtenidos con otras investigaciones previas de las que se disponía.

3.2.1.1 Recta de calibrado del sulfato de cobre

En este epígrafe, se empieza reseñando el material necesario para la realización de este proceso en la Tabla 3-1:

| Material necesario | Reactivos |
|--|---|
| Balanza | Sulfato de cobre (II) |
| Probeta 100 ml | NH_3 (2,5% de NH_3 en agua) |
| Matraces Erlenmeyer de diferentes volúmenes | - |
| Agitador orbital y barra agitadora | |
| Jeringuilla | - |
| Vasos de precipitados | - |
| Vidrio de reloj | - |
| Espectrofotómetro y probetas de cuarzo utilizadas en él. | - |

Tabla 3-1. Material y reactivos necesarios para la realización de la recta de calibrado.

Tras exponer el material que será necesario, se procede a preparar el medio hídrico contaminado y, para la posterior toma de datos, es necesario realizar ahora lo que se denomina recta de calibrado del sulfato de cobre.

Para ello, será necesario preparar diferentes vasos con concentraciones diferentes de sulfato de cobre. La concentración inicial será de cinco gramos por litro y las cuatro siguientes serán disminuyendo un gramo cada uno de ellos, hasta llegar a una concentración en el último matraz con concentración de un gramo por litro.

Para el análisis de los distintos valores de adsorbancia que se querían obtener fue necesario realizar el método analítico colorimétrico que se detalla a continuación.

- Método de determinación del cobre:

Este método se basa en la formación de la unión compleja entre el amoniaco y el cobre. Este ion complejo presenta un color azul intenso que es de fácil medición en un espectrofotómetro. El proceso que se debe seguir tiene los siguientes pasos:

1. Se toman 4 mililitros de la muestra con la determinada concentración de sulfato de cobre.
2. Se le añade 1 mililitro de una disolución de NH_3 (2,5 % de NH_3 en agua) y a continuación se agita.
3. Se mide la adsorbancia a una longitud de onda que se debe calcular para el compuesto. En este caso como se expresa en el punto es de 600 nm.

Este proceso se seguirá para cada muestra de la que se quiere medir su absorbancia en el espectrofotómetro.

Una vez explicado el método colorimétrico utilizado para el cobre, se procede a realizar la recta de calibrado. De cada disolución con diferentes concentraciones, se hace el proceso explicado y se va obteniendo una recta cuyos ejes serán: la adsorbancia en el eje de abscisas y la concentración de sulfato de cobre en agua destilada en el eje de ordenadas.

Inicialmente se intentó hacer la recta de calibración con una concentración de 50 miligramos por litro, pero se observó que, con concentraciones muy bajas, no se conseguían obtener de manera correcta los valores para la calibración, y por ello se decidió hacer una disolución con una concentración del sulfato de cobre (II) de cinco gramos por litro.

Para que las medidas que se toman sean correctas se necesita como ya se ha explicado previamente, determinar la longitud de onda en la que debe trabajar el espectrofotómetro ya que según el compuesto será diferente.

Para el cálculo de la longitud de onda se trabajará en el modo 3 que recibe el nombre de escaneo de longitud de onda. Este modo permite graficar la reacción que tiene la disolución elaborada a las distintas longitudes de onda en las que puede trabajar el espectrofotómetro. Hay casos en los que una elevada cantidad de soluto puede sacar la medición de rango.

Por tanto, se introdujo en la probeta de cuarzo (válida por su tamaño para introducir en esta máquina) la mezcla de 4 ml de sulfato de cobre (II) de concentración 5g/L con 1 ml de NH_3 , se activó el modo 3 y se empezó a realizar barridos en las diferentes longitudes de onda de trabajo para comprobar cuál era la más adecuada.

Primero se realiza un barrido entre 190 y 1100 nm, y se observa que trabaja en torno a los 600 nm. Para darle más exactitud, ya que se trata de un proceso científico, se reduce el haz de barrido a uno entre 500 nm y 700 nm, dando también un resultado de 600 nm. En la Figura 3-15 se puede observar que tras varios barridos se determinó que la longitud de onda de trabajo sería la ya indicada de 600 nm.

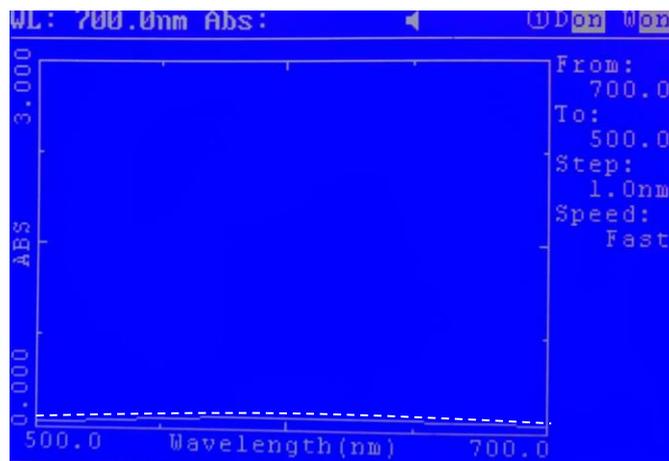


Figura 3-15. Longitud de onda en la que trabaja la disolución de sulfato de cobre y amoniaco.

Una vez obtenida ya la longitud de onda de trabajo, se procede a activar el modo 1 del espectrofotómetro que es el que recibe el nombre de fotométrico. Este modo permite que se realicen medidas de adsorbancia, transmitancia y concentración de una muestra. En este caso, el modo mencionado se utiliza para la medida de la adsorbancia de las distintas muestras elaboradas.

Lo primero que se debe realizar una vez se active el nuevo modo es establecer un patrón, tratándose en este caso en el de agua destilada. El valor de adsorbancia que se le asocia a esta muestra del agua debe ser de 0. Una vez medida y establecida la muestra patrón, se pueden ir introduciendo las disoluciones que se han ido tomando, obteniendo de esta manera sus valores de adsorbancia.

Con cada una de las muestras elaboradas con distintas concentraciones de sulfato de cobre (mostradas en la Tabla 3-2 en gramo por litro) se consigue obtener la siguiente recta de calibración.

| ABS (600nm) | Cu(g/L) |
|--------------|---------|
| 0,744 | 5 |
| 0,581 | 4 |
| 0,446 | 3 |
| 0,289 | 2 |
| 0,151 | 1 |
| 0,000 | 0 |

Tabla 3-2. Valores de la concentración utilizada y sus valores de adsorbancia asociados.

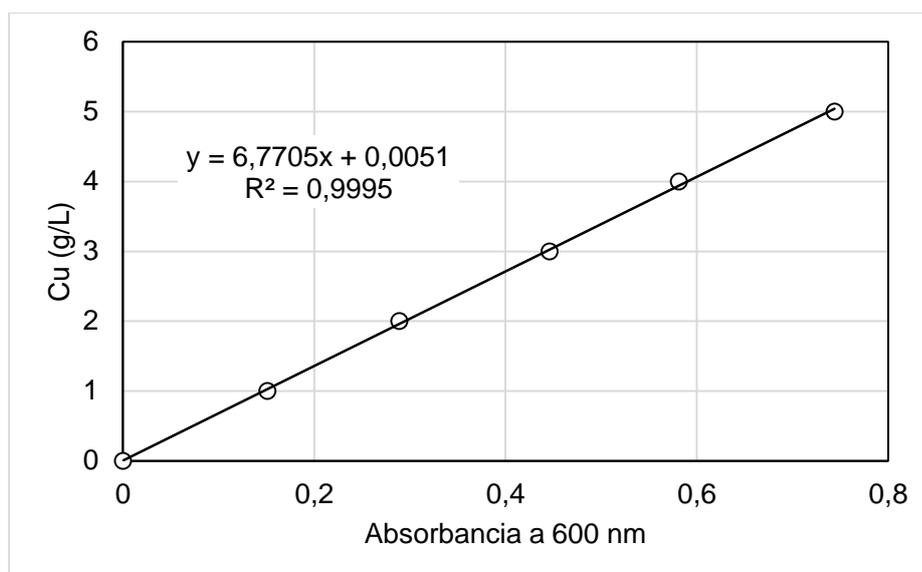


Figura 3-16. Recta de calibrado de sulfato de cobre (II).

Con los valores de concentración de las disoluciones y sus valores de adsorbancia asociada se puede elaborar una gráfica en la que quede reseñada la recta de calibrado del sulfato de cobre con el amoniaco. Esta recta se puede observar en la Figura 3-16.

Las dos experimentaciones realizadas, con espirulina y carbón activo, usarán el sulfato de cobre (II) como soluto en agua destilada y, por tanto, la recta de calibrado será la misma para ambos procesos. Para líneas futuras y posibles pruebas con otros solutos de metales, destacar la importancia de realizar esta recta de calibrado del compuesto que se vaya a utilizar.

3.2.2 Adsorbente inmovilizado.

Como ya se explica en el estado del arte, la adsorción es un proceso por el cual átomos, iones o moléculas son atrapados o retenidos en la superficie de un material. En el caso de esta experimentación que se va a realizar las superficies serán carbón activo y espirulina.

Lo que se pretende con esta experimentación es conseguir recuperar los metales disueltos en el agua residual que se utiliza. Esta agua se ha conseguido mezclando agua destilada con sulfato de cobre como se explica en el epígrafe anterior. El adsorbente se podría utilizar de muchas maneras para retener el adsorbato, pero se decide que la forma que ofrece un mejor funcionamiento es mediante su inmovilización.

Y para responder al por qué de utilizarlo de manera inmovilizada es importante aludir las desventajas que tienen el carbón activo y la espirulina directamente relacionadas con su elevada área superficial si se encuentran en polvo. Entre estos inconvenientes destacan la dificultad de trabajo con ellos y la facilidad que tienen para poder obturar membranas. Si se inmoviliza se consigue facilitar el almacenaje y utilización.

| Material necesario | Reactivos |
|---|----------------------------------|
| Balanza | Alginato sódico |
| Probeta 100 ml | Cloruro cálcico |
| Matraces Erlenmeyer de diferentes volúmenes | Carbón activo |
| Agitador orbital y barra agitadora | Spirulina Platensis (Espirulina) |
| Jeringuilla | - |
| Vasos de precipitados | - |
| Vidrio de reloj | - |

Tabla 3-3. Materiales y reactivos utilizados para las esferas de adsorbente inmovilizado.

El procedimiento para inmovilizar el carbón activo y la espirulina es el mismo. En la Tabla 3-3 se observa el material y reactivos necesarios para su preparación. Comienza con la preparación de dos vasos de precipitados diferentes cuyas composiciones se explican a continuación.

Por un lado, se mezcla en el primer vaso de precipitados 5 gramos de alginato sódico y 2 gramos del material utilizado como adsorbente, en este caso se trata del alga espirulina y del carbón activo, con 100 mililitros de agua destilada.

Por el otro lado, se prepara también un vaso de precipitados una disolución de 0,475 M de cloruro cálcico y una vez hecho, se coloca en la placa con agitación para que el cloruro cálcico se disuelva.

Ya se dispone de los dos compuestos que se necesitan para conseguir un adsorbente inmovilizado. Del primer vaso de precipitados preparado se deben ir cogiendo con una jeringuilla y depositarlos en el segundo vaso lo que le produce que coja un estado mucho más sólido y fijo.

Lo recomendado en la práctica utilizada como guía, es desde una jeringuilla echar el compuesto del primer vaso en el segundo. Para conseguir que esas esferas que después se utilizarían dentro de la columna de adsorción no obstruyan posibles salidas del régimen de flujo del medio hídrico, en lugar de utilizar la jeringuilla, se procedió a hacer previamente las bolas a mano para después introducirlas en el segundo vaso de precipitados.

Para hacer este nuevo método elegido, se coge con una jeringuilla el medio hídrico del segundo vaso y se moja ligeramente la mano. Tras ello, del primer vaso se coge una cantidad que fuese suficiente para darle una forma esférica de un tamaño adecuado para no generar diferentes problemas. Se le da forma con las manos y finalmente se introduce en el vaso dos que se encontraba en agitación. En ese segundo vaso ya van cogiendo forma las esferas y una solidez suficiente para poder realizar su posterior trasvase a la columna de adsorción.

Más adelante se le podrá ver la utilidad a estas esferas y será cuando se introduzcan en la planta piloto, donde se verá la comodidad en su colocación e intercambio, además de por supuesto su función principal que es trabajar como adsorbente de bajo coste.

Para conseguir un número de esferas suficientes para realizar el desarrollo experimental del trabajo, se realizó tres veces el proceso de mezcla de ambos vasos de precipitado. En la Figura 3-17 se puede observar como quedaron ambos procesos, tanto las esferas de espirulina inmovilizada como las de carbón activo inmovilizado. Las que se distinguen de color de verde son de espirulina y las negras de carbón activo, colores relacionados con el compuesto utilizado como adsorbente y su forma inicial.



Figura 3-17. Esferas de espirulina y carbón activo inmovilizado.

Este proceso de inmovilización se podría realizar con otros tipos de adsorbentes, pero como a lo largo del trabajo se va exponiendo, los buenos resultados ofrecidos por estos dos en el trabajo de fin de grado del alférez de navío Iñaki Paz Armada [12], hace decantar la balanza por la espirulina y el carbón activo.

3.2.3 Preparación de la planta piloto para la experimentación

Tras la explicación en epígrafes anteriores de la preparación de la disolución del agua contaminada y posteriormente la preparación de las esferas de adsorbente inmovilizado, se va a proceder a su colocación dentro de la planta piloto construida y explicada en la Construcción.

Por un lado, la colocación del compuesto elaborado con agua destilada y sulfato de cobre directamente en el tanque.

Por otro lado, está el proceso de colocación de las esferas, que trata en colocarlas dentro de lo utilizado como columnas de adsorción ya que se considera un proceso simple para su recambio en caso de su saturación o de querer variar el tipo de adsorbente.

En las diferentes figuras que se pueden observar y gracias a la explicación del epígrafe, el agua situada dentro del tanque obtiene un color azul, generado por su mezcla con el sulfato de cobre (II).

El siguiente proceso que se realiza es el cálculo del caudal, que tras la colocación en el interior del tanque y tras colocarle ese grifo de dos vías que se explica varía con respecto a las condiciones iniciales que ofrecía. También como se explica, el caudal varía por la altura que debe subir. Tras tener en cuenta todas las variables, se obtiene como valor del caudal de este proceso uno de $2,053 \cdot 10^{-5}$ metros cúbicos por segundo. Este dato será muy importante para la elaboración de las tablas y gráficas posteriores. Además, el caudal podría sufrir variaciones como también se menciona anteriormente de dos maneras: añadiendo más bombas al sistema o retirando esa bifurcación que tiene al inicio de la construcción.



Figura 3-18. Forma de la que quedan colocadas las esferas de adsorbente (Espirulina a la izquierda y carbón activo a la derecha).

4 RESULTADOS

4.1 Resultados y análisis

En este epígrafe se va a proceder a mostrar los resultados que se han obtenido durante todo el proceso del trabajo de fin de grado. Se va a dividir en dos apartados principales, uno enfocado al diseño y construcción de la planta piloto para tratamiento de aguas contaminadas, y otro que muestra resultados de dos experimentos realizados para comprobación de funcionamiento de la planta y también de la efectividad de los adsorbentes de bajo coste.

4.1.1 Diseño y construcción de la planta piloto

El objetivo principal de este trabajo de fin de grado es la construcción de una planta piloto a escala de laboratorio que pueda ser usada en la experimentación de tratamientos de adsorción para aguas residuales de buques con residuos MARPOL.

En el desarrollo se explica que se fueron probando diferentes diseños que buscaban cumplir las diferentes especificaciones establecidas en el punto 3.1.1. Las variables que había que tener en cuenta también obligaban a realizar diferentes cambios en los parámetros a establecer en la planta.

Para ello, aquí se va a representar una figura muy esquemática de cómo debería realizarse el montaje de la planta piloto. Como también se indica en el desarrollo, la mayor ventaja que tiene este diseño es su gran versatilidad. Se podría conseguir colocar más columnas de adsorción de manera vertical favoreciendo un tratamiento de aguas de manera mucho más veloz. Además, cada una podría llevar varios tipos de adsorbentes para que el tratamiento de esas aguas residuales fuese mucho más completo, ya que cada uno de los adsorbentes tiene una serie de características específicas que lo hacen mejor para tratamiento según el tipo de contaminante, principalmente metales pesados.

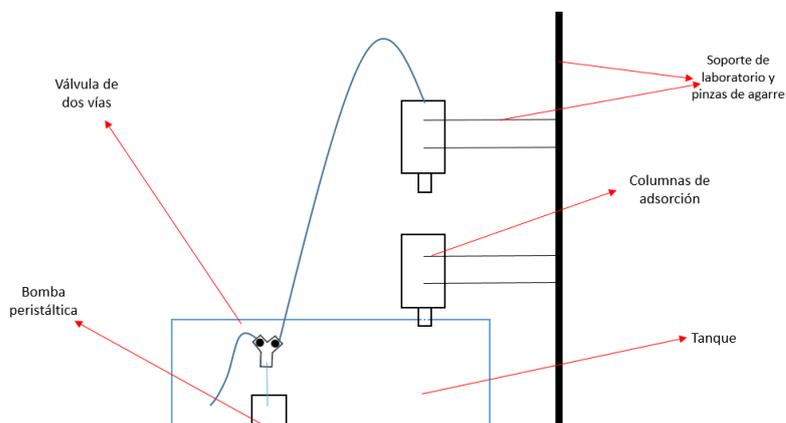


Figura 4-1. Esquema del diseño elegido para la planta piloto a escala de laboratorio.

Como también se explica en el desarrollo, finalmente el diseño presente en la Figura 3-9 fue el que conseguía cumplir todas las especificaciones y por ello tras decantarnos por él se procedió a su construcción. Los materiales utilizados para su montaje pueden variar según su necesidad. Por ejemplo, las columnas utilizadas realmente no son columnas de adsorción, por ello se podría proceder a buscar nuevas opciones para su repuesto.

Como se ha explicado y para que quede más claro de manera visual, en esta construcción solo existen dos columnas de adsorción donde se encuentran las esferas de espirulina (en este caso) inmovilizada. Al ser de simple montaje se podría cambiar con facilidad el tipo de adsorbente y también el añadir nuevas columnas al proceso. En la Figura 4-2 se observa la construcción final de la planta piloto, lista ya para la prueba experimental.

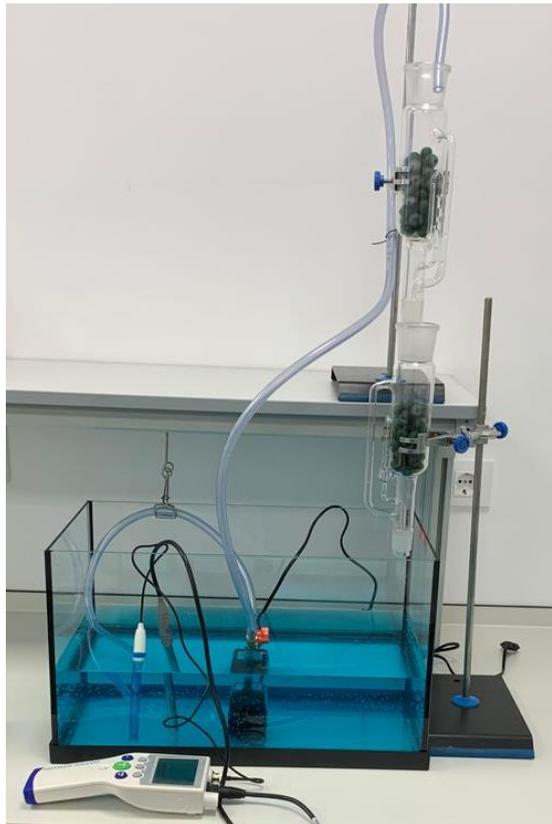


Figura 4-2. Construcción final previa a la realización de la fase experimental.

En la figura superior, se puede observar el momento previo justo al inicio de la toma de datos, donde solo faltaría la conexión de la bomba para empezar su funcionamiento y comenzar ese régimen cíclico que tenía. El experimento fue con espirulina como se puede observar por las esferas de adsorbente. Además, en esta figura ya está colocado el medidor de pH y conductividad para ver cómo sería su posible variación.

4.1.2 Resultados y análisis fase experimental

Para comprobar el correcto funcionamiento de la planta para que posteriormente se pueda usar en trabajos experimentales, se utiliza un contaminante (CuSO_4) y dos adsorbentes que se han usado en trabajos previos. Se realiza una prueba con espirulina como adsorbente y otra con carbón activo. Los datos obtenidos en ambos que se observan en las tablas y figuras siguientes, muestran que estos dos adsorbentes no son los más adecuados para el tratamiento de aguas contaminadas con cobre. Por ello, en líneas futuras se propondrá la opción de realizar experimentaciones o bien con otros adsorbentes o con otro tipo de contaminantes como podría ser el cromo.

4.1.2.1 Fase 1. Espirulina

Una vez se ha realizado la construcción de la planta piloto, se procede a realizar dos experimentos para comprobar su buen funcionamiento, y por supuesto, también el de las esferas elaboradas con adsorbente inmovilizado.

Se activa la bomba y el caudal calculado empieza a recorrer el circuito construido. Para la toma de datos, se decide tomar medidas de pH, conductividad y una muestra del agua contaminada para con el espectrofotómetro calcular su adsorbancia y, en consecuencia, concentración de contaminante remanente.

La toma de todos estos valores será cada ocho minutos y siete segundos que es lo que tarda todo el medio hídrico presente en el tanque en pasar por el circuito (debido al caudal ofrecido por la bomba). En la Tabla 4-1 se observan todos los datos y resultados que se han obtenido. Los valores de esta tabla que aparecen en la última columna se hacen en función de la ecuación obtenida a través de la elaboración de la recta de calibrado. Esta ecuación utilizada es $y = 6,7705x + 0,0051$. Para la Tabla 4-2, la ecuación será la misma. La única diferencia son los valores de absorbancia que se van colocando en la ecuación para a su vez obtener la variación de concentración de contaminante.

| Tiempo (min) | CONDUCTIVIDAD | pH | ABS (600 nm) | Cu (g/L) |
|--------------|---------------|-------|--------------|----------|
| 0 | 2,240 | 4,860 | 0,734 | 4,97 |
| 8,12 | 2,320 | 4,870 | 0,730 | 4,95 |
| 16,23 | 2,360 | 4,850 | 0,727 | 4,93 |
| 24,35 | 2,370 | 4,880 | 0,718 | 4,87 |
| 32,47 | 2,390 | 4,860 | 0,712 | 4,83 |
| 40,58 | 2,400 | 4,860 | 0,717 | 4,86 |
| 48,70 | 2,440 | 4,850 | 0,709 | 4,81 |
| 56,82 | 2,750 | 4,850 | 0,709 | 4,81 |
| 64,93 | 2,780 | 4,840 | 0,709 | 4,81 |
| 73,05 | 2,790 | 4,850 | 0,714 | 4,84 |
| 81,17 | 2,810 | 4,840 | 0,714 | 4,84 |
| 89,28 | 2,820 | 4,850 | 0,709 | 4,81 |
| 97,40 | 2,840 | 4,850 | 0,700 | 4,74 |
| 105,52 | 2,850 | 4,850 | 0,701 | 4,75 |
| 113,63 | 2,860 | 4,840 | 0,704 | 4,77 |
| 121,75 | 2,860 | 4,840 | 0,694 | 4,70 |
| 129,87 | 2,880 | 4,840 | 0,698 | 4,73 |
| 137,98 | 2,890 | 4,830 | 0,693 | 4,70 |
| 146,10 | 2,900 | 4,820 | 0,693 | 4,70 |
| 154,22 | 2,910 | 4,820 | 0,693 | 4,70 |

Tabla 4-1. Valores de las mediciones realizadas con espirulina.

A partir de todos estos datos, se ha elaborado una gráfica que permite ver la variación que sufre la concentración de contaminante en el medio hídrico por la influencia del adsorbente utilizado.

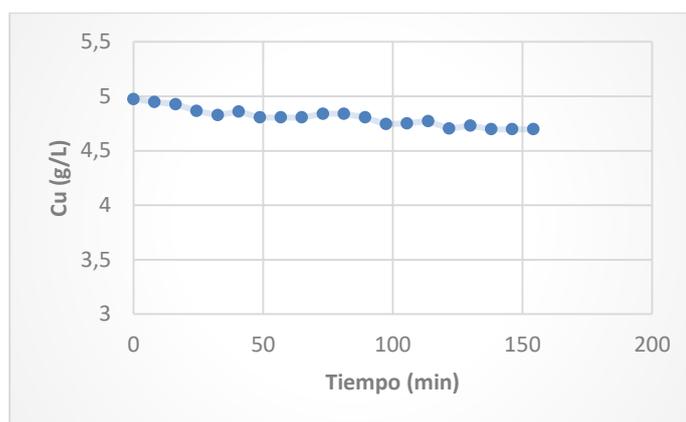


Figura 4-3. Gráfica representativa de variación de la concentración de contaminante presente tras usar espirulina.

4.1.2.2 Fase 2. Carbón activo

Se realiza el mismo experimento, pero con carbón activo como adsorbente. Los tiempos utilizados y medidas tomadas son las mismas para comprobar sus diferencias con la espirulina. A partir de ello se obtiene la Tabla 4-2 donde se observan los datos y resultados obtenidos para carbón activo:

| Tiempo (min) | CONDUCTIVIDAD | pH | ABS (600 nm) | Cu (g/L) |
|--------------|---------------|-------|--------------|----------|
| 0,00 | 2,180 | 4,920 | 0,710 | 4,81 |
| 8,12 | 2,250 | 4,870 | 0,703 | 4,76 |
| 16,23 | 2,280 | 4,850 | 0,702 | 4,76 |
| 24,35 | 2,320 | 4,760 | 0,699 | 4,74 |
| 32,47 | 2,330 | 4,730 | 0,698 | 4,73 |
| 40,58 | 2,350 | 4,730 | 0,685 | 4,64 |
| 48,70 | 2,370 | 4,680 | 0,683 | 4,63 |
| 56,82 | 2,380 | 4,670 | 0,685 | 4,64 |
| 64,93 | 2,390 | 4,640 | 0,687 | 4,66 |
| 73,05 | 2,680 | 4,720 | 0,684 | 4,64 |
| 81,17 | 2,690 | 4,600 | 0,683 | 4,63 |
| 89,28 | 2,710 | 4,610 | 0,683 | 4,63 |
| 97,40 | 2,710 | 4,590 | 0,685 | 4,64 |
| 105,52 | 2,710 | 4,580 | 0,682 | 4,62 |
| 113,63 | 2,730 | 4,580 | 0,680 | 4,61 |
| 121,75 | 2,730 | 4,560 | 0,677 | 4,59 |
| 129,87 | 2,740 | 4,560 | 0,681 | 4,62 |
| 137,98 | 2,750 | 4,560 | 0,681 | 4,62 |
| 146,10 | 2,750 | 4,560 | 0,685 | 4,64 |
| 154,22 | 2,750 | 4,560 | 0,677 | 4,59 |

Tabla 4-2. Valores de las mediciones realizadas con carbón activo.

Con los datos de la Tabla 4-2, se ha elaborado una gráfica que permite ver la variación que sufre la concentración de contaminante en el medio hídrico por la influencia del adsorbente utilizado.

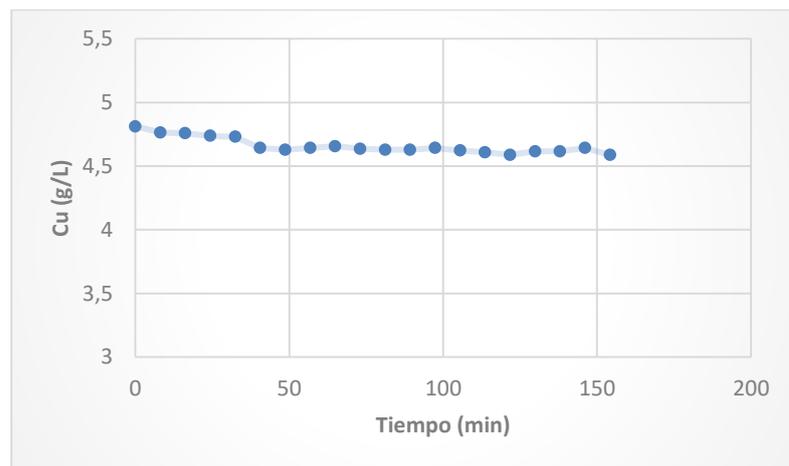


Figura 4-4. Gráfica representativa de variación de la concentración de contaminante presente tras usar carbón activo.

4.1.2.3 Análisis fase 1 y fase 2

A continuación en este epígrafe, se van a analizar los resultados obtenidos y que se pueden observar en 4.1.2. Se pueden diferenciar dos fases: una realizada con espirulina (Fase 1) y otra con carbón activo (Fase 2).

Con los resultados obtenidos se pueden sacar varios puntos a analizar, entre los que destacan:

- Primero, se puede observar que la concentración de ambas gráficas no baja de manera reseñable. Aunque sí se observa que la concentración disminuye, quizá no de manera como para considerar estos adsorbentes efectivos como tratamiento para aguas contaminadas con cobre.
- Los datos obtenidos son concordantes con los datos experimentales de que se disponían para contaminantes de este tipo [11], lo que hace pensar que el diseño es adecuado para utilizarlo en posteriores investigaciones del método de adsorción.
- Que la concentración disminuya, aunque no sea de manera reseñable, quiere decir que el flujo cíclico que circula a través de la planta piloto sí que funciona de manera correcta. El objetivo inicial se trataba de conseguir construir una planta piloto a escala de laboratorio que permitiese que un agua residual pasase a través de un adsorbente para a través de la adsorción conseguir tratarla.
- Observando la Figura 4-3 y Figura 4-4, en el que se muestran las concentraciones de contaminante tras el paso por la planta piloto, coincide con los resultados obtenidos en trabajos anteriores [12]. Como conclusión a estos resultados, se puede decir que estos adsorbentes no son los más adecuados para el tratamiento de un metal pesado como el cobre. Otro tipo de adsorbentes podrían ser más efectivos para el tratamiento de este contaminante. Por otro lado, en esas investigaciones anteriores se comprueba que estos adsorbentes funcionan mejor con metales aniónicos como el cromo.
- Debido a la posibilidad, con el medidor de pH y conductividad se aprovecha para tomar datos cada vez que los 10 litros de agua contaminada realizan una vuelta completa al flujo cíclico elaborado. Aunque se ve que el pH va disminuyendo con el paso del tiempo y la conductividad es cada vez mayor, no se pueden analizar los valores y se dejan como medidas para posibles líneas futuras.

5 CONCLUSIONES Y LÍNEAS FUTURAS

5.1 Conclusiones

El primer punto a destacar después de los resultados obtenidos es que se ha cumplido con los objetivos iniciales previamente establecidos de diseñar, construir y probar una planta piloto de adsorción a la escala de laboratorio sobre la que se ha podido realizar ensayos para una toma de datos eficaz.

En este apartado, en función a los resultados obtenidos, se pueden obtener las siguientes conclusiones:

1. Se ha construido una planta piloto a escala de laboratorio, que mediante el método de adsorción debe servir como planta de tratamiento de aguas contaminadas.
2. Previo a la construcción de esta planta, se han probado varias configuraciones posibles, considerando la utilizada como la mejor.
3. Se quiere aplicar la adsorción y para ello se busca la mejor manera de ubicar los adsorbentes en la planta piloto para facilitar la adsorción, evitando así problemas en el flujo cíclico del sistema. Para ello, tras la prueba de varias formas de ubicar el adsorbente, se encuentra la mejor manera de colocarlo utilizando esferas de adsorbente inmovilizado.
4. Tras elegir el diseño de la planta piloto se procedió a su construcción. Para probar su funcionamiento se seleccionaron dos tipos de adsorbente y se procedió a realizar la prueba de funcionamiento con un medio hídrico contaminado con CuSO_4 , del que se tiene referencia de trabajos anteriores. Tras los experimentos realizados se llega a la conclusión que los resultados concuerdan con los obtenidos en estudios previos, comentando que la biomasa de algas o carbón activo puede no tratarse del mejor método para el tratamiento de metales catiónicos.
5. La planta piloto funciona de manera correcta como un flujo cíclico en que un agua residual pasaría a través de los adsorbentes colocados en las columnas de adsorción.
6. La construcción del sistema permite que se puedan añadir o intercambiar elementos dentro del mismo (como podría ser añadir más bombas o columnas) que le ofrece mayor versatilidad.

5.2 Líneas futuras

Los resultados obtenidos en este trabajo demuestran la utilidad de la aplicación de la adsorción en una planta piloto a escala de laboratorio construida. Con los resultados obtenidos se recomiendan las siguientes líneas de trabajo para el futuro:

1. Prueba con diferentes tipos de adsorbentes de bajo coste dentro de la planta para poder comprobar su efectividad. Además de ello, probar que adsorbente será mejor para el tratamiento de diferentes tipos de contaminantes.

2. Realizar pruebas más precisas de detección de contaminantes, que se hicieron en anteriores trabajos, y que por las circunstancias no se pudieron realizar en este.
3. Prueba de la planta piloto con contaminantes aniónicos.
4. Usar esta planta piloto para combinar distintos adsorbentes estudiando la efectividad de combinarlos.
5. Estudio del alga como adsorbente puede funcionar mejor según el tipo de contaminante, especialmente guiado a tipos de metales pesados.
6. Realizar un trabajo guiado a la construcción de esta planta piloto a mayor tamaño para seguir demostrando su efectividad y correcto funcionamiento.
7. Tras probar este tamaño a una mayor escala, análisis de su posible implementación en buques de la Armada española con residuos MARPOL

6 BIBLIOGRAFÍA

- [1] «Fundación Aquae,» [En línea]. Available: <https://www.fundacionaquae.org/importancia-del-agua/>. [Último acceso: 12 2021].
- [2] «Organización de las Naciones Unidas,» [En línea]. Available: <https://www.un.org/sustainabledevelopment/es/water-and-sanitation/>. [Último acceso: 27 01 2021].
- [3] «Oxfam Intermón,» [En línea]. Available: <https://blog.oxfamintermon.org/cuales-son-las-principales-causas-de-la-contaminacion-del-agua/>. [Último acceso: 25 01 2021].
- [4] «Organización Mundial de la Salud,» 14 Junio 2021. [En línea]. Available: <https://www.who.int/es/news-room/fact-sheets/detail/drinking-water>. [Último acceso: 27 Enero 2021].
- [5] Organización Marítima Internacional, «Marpol 73/78,» 2002. [En línea]. Available: [https://www.imo.org/es/About/Conventions/Paginas/International-Convention-for-the-Prevention-of-Pollution-from-Ships-\(MARPOL\).aspx](https://www.imo.org/es/About/Conventions/Paginas/International-Convention-for-the-Prevention-of-Pollution-from-Ships-(MARPOL).aspx). [Último acceso: 23 Enero 2021].
- [6] OMI, «Convenio Marpol,» 2005. [En línea]. Available: <https://www.cetmar.org/documentacion/MARPOL.pdf>. [Último acceso: 23 Enero 2021].
- [7] «CoceptoDefinición,» [En línea]. Available: <https://conceptodefinicion.de/contaminacion/>. [Último acceso: 02 Febrero 2021].
- [8] Valdivieso, Alberto, «iAgua,» [En línea]. Available: <https://www.iagua.es/respuestas/tipos-contaminantes-agua>. [Último acceso: 01 Febrero 2021].
- [9] «iagua,» [En línea]. Available: <https://www.iagua.es/blogs/pedro-pablo-lone/indicadores-calidad-agua>. [Último acceso: 22 Febrero 2021].
- [10] Organización Mundial de la Salud, «Guía para la calidad del agua potable,» Ginebra, 2011.
- [11] «EPA,» [En línea]. Available: <https://web.archive.org/web/20080218094403/http://www.brownfieldstsc.org/glossary.cfm?q=1>. [Último acceso: 27 ENERO 2021].
- [12] AN Iñaki Paz Armada, *Selección de residuos orgánicos como adsorbentes de bajo coste para la eliminación de contaminantes en aguas.*, Marin, Pontevedra, 2017-2018.

- [13] Elena Dionisio Ruiz, «Aprovechamiento de residuos vegetales para la eliminación de cobre presente en medios acuosos mediante biosorción,» Granada, 2012.
- [14] Hermógenes Rosas Rodríguez, *Estudio de la contaminación por metales pesados en la cuenca del Llobregat*, Universidad Politécnica de Cataluña, 2001.
- [15] Sandhya Babel, Tonni Agustiono Kurniawan, «Low-cost adsorbents for heavy metals uptake from contaminated water: a review,» *Journal of hazardous materials*, p. 219, 2002.
- [16] Candelaria Tejada-Tovar, Ángel Villabona-Ortiz, Luz Garcés-Jaraba, «Adsorción de metales pesados en aguas residuales usando materiales de origen biológico,» 2014.
- [17] Gonzalo M. Figueroa-Torres, «Effect of Copper and Iron on Acidogenic Biomass in an Anaerobic Packed Bed Reactor,» *SciRes (Scientific Research)*, p. 8, 2014.
- [18] Josefina Plaza Casón, *Remoción de metales pesados empleando algas marinas*, La Plata, 2012.
- [19] R. García-González, R.M. Gómez Espinosa, P. Ávila-Pérez, B. García Gaitán, J.L. García Rivas, R.E. Zavala-Arce, «ESTUDIO DE BIOSORCIÓN DE Cu²⁺ EN EL CRIOGEL QUITOSANO-CELULOSA,» *Revista Mexicana de Ingeniería Química*, 2015.
- [20] Francisco Hernáinz Bermúdez de Castro, Gabriel Blázquez García, Mónica Calero de Hoces, M^a Ángeles Martín-Lara, «Influencia de algunas variables en la biosorción de plomo con residuos agrícolas,» *Afinidad*, 2008.
- [21] Fernando Egea, Rene García, Leonarndo Figueroa y Manuel Vega Di Nezio, «Fenomenos de Superficie,» 2013.
- [22] Norma A.Cuizano, Bertha P.Llanos, Abel E.Navarro, «Aplicaciones ambientales de la adsorción mediante biopolímeros naturales,» 2009.
- [23] Norma A.Cuizano y Abel E. Navarro, «Biosorción de metales pesados por algas marinas: posible solución a la contaminación a bajas concentraciones,» 2007.
- [24] Marina Gersony, «Best Magazine Mosaico,» [En línea]. Available: <https://www.mosaico-cem.it/cultura-e-societa/salute/la-spirulina-non-sicura>.
- [25] M.C. Basso, E.G.Cerella y A.L. Cukierman, «Empleo de algas marinas para la biosorción de metales pesados de aguas contaminadas,» *Avances en energías renovables*, 2002.
- [26] Vonshak, Avigad, «Spirulina platensis (Arthrospira): physiology, cell-biology and biotechnology,» *Taylor&Francis*, 2002.
- [27] Bernardo David Torres Urango, Daniel Correa Trujillo, *Diseño conceptual de un proceso de cultivo y obtención de Cyanobacteria Arthrospira Platensis*, Medellín: Universidad EAFIT, 2008.
- [28] C.Cameselle, J.Sánchez, *Biosorción de mercurio (Hg²⁺) usando materiales sólidos residuales como adsorbentes*, Vigo: Universidad de Vigo, 2016.
- [29] «CPL CARBON LINK,» [En línea]. Available: <https://web.archive.org/web/20110405111941/http://www.activated-carbon.com/carbon.html>. [Último acceso: 12 FEBRERO 2021].
- [30] «Capítulo 4. Adsorción,» [En línea]. Available: http://catarina.udlap.mx/u_dl_a/tales/documentos/lic/ponce_o_e/capitulo4.pdf.

- [31] «Desotec Activated Carbon,» [En línea]. Available: <https://www.desotec.com/es/carbonologia/casos/poros-de-carb-n-activado>. [Último acceso: 23 Febrero 2021].
- [32] «Carbón activado y su propiedades,» [En línea]. Available: <http://tesis.uson.mx/digital/tesis/docs/20980/Capitulo1.pdf>. [Último acceso: 19 1 2021].
- [33] «Carbotecnia,» [En línea]. Available: <https://www.carbotecnia.info/aprendizaje/carbon-activado/que-es-carbon-activado/>. [Último acceso: 23 Febrero 2021].