



UNIVERSITAT
POLITÈCNICA
DE VALÈNCIA



ESCUELA TÉCNICA
SUPERIOR INGENIEROS
INDUSTRIALES VALENCIA

Curso Académico:

Agradecimientos

Extiendo un especial agradecimiento a mi apreciada profesora y tutora, la Dra. María Isabel Iborra Clar, por todo su apoyo y especial atención durante la realización de este trabajo, brindándome toda su ayuda, paciencia y entendimiento. De igual forma, me gustaría agradecer a mi apreciada cotutora, la Dra. María José Luján Facundo, por haberme dedicado tanto tiempo y apoyo. Ambas habéis sido el pilar fundamental de este trabajo.

A mi pareja por el apoyo incondicional que me ha dado a lo largo de estos últimos años y a mis amigos y futuros ingenieros químicos que siempre han prestado su ayuda y han confiado en mí, muchas gracias.

A mi familia, gracias por creer en mí. Este logro no es solo mío, es de vosotros.

Resumen

Los compuestos farmacéuticos como contaminantes emergentes son un problema ya que, actualmente no son eliminados en los procesos convencionales de depuración. Estos compuestos tienen efectos sobre el medio ambiente y la salud humana poco conocidos. Además, a medio o largo plazo podrían llegar a producir efectos perjudiciales sobre la fauna acuática y sobre la salud humana. Así pues, serán necesarios tratamientos adicionales que mejoren los grados de eliminación de los mismos. Uno de estos tratamientos es el carbón activo que, mediante fenómenos de adsorción, retiene los compuestos eliminándolos del agua. En el presente TFG, se va a diseñar un sistema de eliminación de dichos compuestos mediante adsorción con carbón activo granular (GAC) para tratar un caudal de 1000 HE de salida de EDAR. Para ello, previamente, se caracterizará el carbón a utilizar, mediante la determinación de isotermas y posteriormente se diseñará la columna de adsorción, variando sus parámetros de operación (caudal de alimento y altura de la zona de transferencia).

Palabras clave: compuestos farmacéuticos, agua residual, carbón activo, contaminantes emergentes, columna de adsorción, EDAR

Title

Design of a plant to eliminate pharmaceutical pollutants from wastewater by treatment with granular activated carbon.

Abstract

Pharmaceutical products as emerging contaminants are a problem because they are not currently eliminated in conventional wastewater treatment processes. These compounds have little known effects on the environment and human health. In addition, in the medium or long term they could have harmful effects on aquatic fauna and on human health. Therefore, additional treatments that improve the depletion rate of them will be necessary. One of these treatments is the activated carbon that, by means of adsorption phenomenon, retains the compounds removing them from the water. In the present TFG, a system for eliminating these products by means of adsorption with granular activated carbon (GAC) is to be designed to treat an effluent from a wastewater treatment plant (WWTP) of 1.000 PE. For this, previously, the carbon to be used will be characterized, by means of the determination of isotherms and subsequently the adsorption column will be designed, varying two operation parameters (feed flow and transfer zone height).

Key words: pharmaceutical compounds, wastewater, activated carbon, emerging contaminants, adsorption column, WWTP

Títol

Disseny d'una planta d'eliminació de compostos farmacèutics provinents d'aigües residuals mitjançant tractament amb carbó actiu granular.

Resum

Els compostos farmacèutics com a contaminants emergents són un problema ja que, actualment no són eliminats en els processos convencionals de depuració. Aquests compostos tenen efectes sobre el medi ambient i la salut humana poc coneguts. A més, a mitjà o llarg termini podrien arribar a produir efectes perjudicials sobre la fauna aquàtica i sobre la salut humana. Així doncs, seran necessaris tractaments addicionals que millorin els graus d'eliminació dels mateixos. Un d'aquests tractaments és el carbó actiu que, mitjançant fenòmens d'adsorció, reté els compostos presents en un aigua. En el present TFG, es va a dissenyar un sistema d'eliminació d'aquests compostos mitjançant adsorció amb carbó actiu granular (GAC), per tractar un cabal de 1000 HE de eixida de l'EDAR. Per a això, prèviament, es caracteritzarà el carbó a utilitzar, mitjançant la determinació d'isotermes i posteriorment es dissenyarà la columna d'adsorció, variant els seus paràmetres d'operació (cabal d'aliment i alçada de la zona de transferència).

Paraules clau: compostos farmacèutics, aigües residuals, carbó actiu, contaminants emergents, columna d'adsorció, EDAR

Índice

1. OBJETIVO	1
2. JUSTIFICACIÓN	2
2.1. Justificación técnica	2
2.2. Justificación académica.....	3
3. ANTECEDENTES	3
3.1. Depuración de aguas residuales	3
3.2. Legislación Contaminantes Orgánicos Persistentes (COPS)	4
3.3. Depuración de contaminantes emergentes	4
3.4. Depuración de aguas con carbón activo	5
4. LEGISLACIÓN APLICABLE	5
5. INTRODUCCIÓN TEÓRICA	6
5.1. Características de un agua residual urbana (ARU)	6
5.1.1. Características físicas.....	6
5.1.2. Características químicas	7
5.1.3. Características biológicas	9
5.1.4. Ejemplo de caracterización de un ARU.....	9
5.2. Tratamientos de ARU en una EDAR	11
5.2.1. Pretratamiento.....	11
5.2.2. Tratamiento primario	12
5.2.3. Tratamiento secundario	13
5.2.4. Tratamiento terciario	13
5.3. Tratamiento con carbón activo (CA)	14
5.3.1. Adsorción y fundamentos. Definición de carbón activo.....	15
5.3.2. Tipos de carbón activo.	17
5.4. Fármacos presentes en las AR como contaminantes emergentes.	18
5.4.1. El mercado farmacéutico	18
5.4.2. Clasificación de fármacos. Fármacos en las aguas residuales	20
5.4.3. Características de fármacos	23
5.4.4. Cinética de un lecho de adsorción fijo.....	25
6. METODOLOGÍA EXPERIMENTAL	27
6.1. Materiales. Tipos de carbón activo empleados.	27
6.2. Preparación de las disoluciones sintéticas de fármacos.	28
6.3. Descripción de la columna de adsorción diseñada.	29
6.4. Descripción de las experiencias	32
6.4.1. Obtención de isothermas	32
6.4.2. Ensayos en planta piloto	33

6.5. Métodos analíticos: medida de TOC, HPLC y espectrofotómetro de UV-visible	33
7. RESULTADOS Y DISCUSIÓN	36
7.1. Resultados obtenidos con el Jar-Test.....	36
7.2. Resultados obtenidos con la columna de adsorción	44
7.2.2. Resultados relativos al CAG comercial	44
7.2.2. Resultados relativos al CAG regenerado	48
8. DISEÑO	50
8.1 Cálculos previos	50
8.2 Pretratamiento	50
8.3 Unidad de tratamiento con carbón activo (UTC).....	52
8.4 Desinfección y almacenamiento del agua regenerada	53
8.5 Circuito de limpieza	55
8.5 Diagrama de la instalación	56
9. CONCLUSIONES	58
10. BIBLIOGRAFÍA.....	59
11. PRESUPUESTO	65
11.1. Presupuesto de la mano de obra	65
11.2. Presupuesto de los depósitos.....	65
11.3. Presupuesto de las bombas y válvulas.....	66
11.4. Presupuesto de la instrumentación y control	66
11.5. Presupuesto de los equipos y materiales.....	67
11.6. Presupuesto total de ejecución material	67
11.7. Presupuesto total de ejecución por contrata	68
11.8. Presupuesto base de licitación	68
12. ESTUDIO DE VIABILIDAD ECONÓMICA	69
13. ANEXOS	74
13.1. Cálculo de disoluciones	74
13.2. Ficha técnica carbón activo utilizado	77
13.3. Fichas de seguridad de los reactivos: pictogramas y frases H/P	78

MEMORIA

1. OBJETIVO

El principal objetivo del presente Trabajo Final de Grado (TFG) es diseñar una instalación industrial para eliminar productos farmacéuticos presentes en aguas residuales urbanas a partir del estudio y optimización de una columna de adsorción con carbón activo granular (CAG) a escala de laboratorio.

Además, también se persiguen los siguientes objetivos específicos:

- Estudio y caracterización de un CAG comercial a través de las isothermas de adsorción de dicho carbón para cada uno de los compuestos farmacéuticos estudiados a nivel individual.
- Determinación de los rendimientos de eliminación de los diferentes compuestos farmacéuticos con CAG.
- Estudio de la influencia de la concentración de fármacos en la eliminación a partir de CAG de dichos contaminantes.
- Estudio y optimización a escala de laboratorio de los parámetros de diseño de una columna de adsorción con CAG comercial y regenerado.
- Escalado a partir de la planta de laboratorio estudiada hasta una instalación a nivel industrial de depuración.
- Estudio de viabilidad económica del sistema y presupuesto de la instalación propuesta, teniendo en cuenta sus posibles beneficios medioambientales.

2. JUSTIFICACIÓN

2.1. Justificación técnica

Los contaminantes emergentes, actualmente, son un problema del cual se está comenzando a tomar conciencia por parte de la población en general. Sin embargo, en los próximos años serán un grave problema medioambiental si no se encuentran soluciones a los mismos. Tienen efectos sobre el medio ambiente y la salud humana poco conocidos todavía, si bien se sabe que a medio o largo plazo podrían llegar a producir efectos perjudiciales sobre la fauna acuática y sobre la salud humana (Cortacans Torre, et al., 2016). Entre dichos contaminantes emergentes se encuentran los fármacos, los productos de cuidado personal, los surfactantes, plastificantes, etc. Entre todos estos compuestos, altamente persistentes, los que preocupan en mayor medida son los compuestos farmacéuticos. Los antibióticos, por ejemplo, debido a su alta permanencia, podrían causar la ocurrencia de bacterias resistentes en el medioambiente.

Actualmente los seres humanos consumen grandes cantidades de fármacos, a veces de forma indiscriminada y más de lo estrictamente necesario. Entre el año 2000 y 2010, el consumo general de fármacos ha incrementado un 35%, siendo los países en rápido desarrollo los causantes del 76% del incremento (Brasil, Rusia, India, China y Suráfrica) (Van Boecker et. al., 2014). Tras el consumo de estos productos, dichos compuestos llegan a estaciones depuradoras que no se encuentran preparadas para tratar este tipo de contaminación. Dependiendo de la tipología del fármaco, los tratamientos biológicos convencionales pueden disminuir las concentraciones en escasa medida. Sin embargo, otros fármacos sí que podrían disminuir su concentración durante la depuración, pero al tratarse de cargas elevadas, llegan grandes cantidades igualmente al mar e incluso a las aguas de riego.

Algunos autores han concluido que el estudio es muy complejo, no habiendo patrones en la eliminación en EDARU para fármacos aun perteneciendo a la misma familia. La depuración es incompleta y se debe mejorar para evitar la introducción de estos micro-contaminantes al medioambiental (Jelic et. al., 2011).

Estos contaminantes emergentes pueden ser persistentes también y bioacumularse en el medioambiente a través de la cadena trófica. Todavía estas concentraciones son relativamente bajas y por eso la problemática no ha trascendido ni a los medios de comunicación ni a la población general. Además, el conocimiento sobre su impacto en el medioambiente es aún limitado. Sin embargo, si serán conocidas cuando las concentraciones sigan aumentando a menos que desde la sociedad académica e industrial se investiguen las nuevas tecnologías. Es importante destacar que los contaminantes emergentes se encuentran entre las principales prioridades de los centros de investigación de los organismos dedicados a la protección de la salud y del medioambiente (Environmental Protection Agency EPA, Organización Mundial de la Salud OMS, Comunidad Europea CE).

Aunque existen actualmente algunas tecnologías para la depuración de los mismos, muchas veces resultan ser costosas e inasumibles por la sociedad. Sin embargo, el carbón activo se entiende como un material adsorbente, económico y muy efectivo para tratar aguas con contaminantes emergentes y no biodegradables. Con este trabajo se busca presentar una posible instalación viable técnica y económicamente para tratar agua residual urbana *ARU* contaminadas con contaminantes emergentes de forma técnica y medioambientalmente efectiva para la sociedad.

Este trabajo forma parte de un Proyecto de Investigación e Innovación realizado por la **UPV-ISIRYM** a la Empresa **GECIVAL**, dentro del proyecto concedido por el **INSTITUTO VALENCIANO DE COMPETITIVIDAD EMPRESARIAL – IVACE**, que lleva por título “Investigación en nuevas tecnologías para la Eliminación de Contaminantes Emergentes en Aguas Residuales” (ECEAR). Periodo 2018.

2.2. Justificación académica

El Trabajo de Fin de Grado forma parte de la formación curricular dentro de la titulación de ingeniería química, siendo el último requisito indispensable para la obtención del diploma correspondiente. Con el presente trabajo se busca demostrar las competencias adquiridas a lo largo de la carrera confeccionando las mismas en un trabajo. En este caso se ha hecho referencia a asignaturas específicas de la titulación tales como Experimentación en Ingeniería Química, Transferencia de Materia, Tecnología del Medioambiente, Operaciones de Separación, Procesos Industriales y Proyectos de Ingeniería Química.

Este trabajo ha permitido realizar un diseño de un prototipo de instalación para su posterior escalado a magnitud industrial, desde su parte más analítica hasta el diseño y montaje de la planta piloto para obtener las condiciones de operación que optimicen el rendimiento de la misma, siendo una aproximación práctica al mundo del ingeniero químico.

3. ANTECEDENTES

3.1. Depuración de aguas residuales

Desde el antiguo imperio romano, se han diseñado soluciones de ingeniería para el traslado de agua limpia de manantial hacia la población y de evacuación de las aguas residuales hacia otros cauces, sin embargo, no es hasta entrado el siglo XX cuando empiezan a surgir tecnologías para la depuración de aguas. Es decir, la historia de la depuración y potabilización no es un camino paralelo. El ser humano ha estado preocupado siempre por garantizarse agua fresca y clara pero no ha puesto el mismo empeño en eliminar sus desechos conforme a una conducta ecológica. (Doménech, 2003)

Se debe entender una estación depuradora como un requerimiento para conservar de forma efectiva el medioambiente y con ello conseguir la correcta evolución de la sociedad. En España a mitad del siglo XX se observó como la degradación en los cauces receptores de aguas iba en aumento, debido fundamentalmente a la actividad humana. (Cajigas Delgado, 2012). No es hasta el año 1974 que se da lugar a unas recomendaciones de vertido de los efluentes por parte del Centro de Estudios Hidrográficos.

Con la posterior aprobación de la Ley de Aguas en 1985, se define una estrategia hacia el cuidado de los recursos hídricos. En la misma se estipulaban sanciones por vertidos con concentraciones superiores de contaminantes al límite establecido. Con la posterior adhesión de España a la Comunidad Económica Europea (CEE) en 1986 y el necesario cumplimiento de sus directivas, hizo que se aprobara en España el plan nacional de depuración en 1995. Para ese momento ya se habían construido más de quinientas plantas depuradoras. Para el año 2005 ya se habían construido más de mil depuradoras,

llegando a una cobertura del 80%. Así pues, con todas estas nuevas construcciones, se observa una notable mejora en la calidad de agua de los ríos (habiendo mayores concentraciones de oxígeno disuelto y por lo tanto menor carga orgánica) y el número de playas litorales que cumplen con la directiva de baños ha aumentado (Cajigas Delgado, 2012).

3.2. Legislación Contaminantes Orgánicos Persistentes (COPS)

Desde el año 1999, la Agencia Ambiental Europea (EEA) ha considerado este problema como un asunto importante, estableciendo así el requerimiento de investigar al respecto para proponer tratamientos eficientes. No es hasta el año 2003, en el llamado Consejo de Estocolmo, donde se lleva a cabo una clasificación de la peligrosidad ambiental de un gran número de sustancias farmacéuticas. Además, se dictaminó dar prioridad al desarrollo de productos más respetuosos con el medio ambiente. En ese mismo año, se aprobó un protocolo específico para los COP, que afectaría a la Unión Europea y a España.

Para trasponer las decisiones del Consejo de Estocolmo, la Unión Europea (UE) en 2004 aprobó una directiva (CE 850/2004) del Parlamento Europeo y del Consejo Europeo, cumpliendo así el protocolo de los contaminantes. A nivel estatal, España inició en 2005 la elaboración de un Plan Nacional de Aplicación (PNA), que finalmente se actualizó en 2013, sobre los contaminantes orgánicos persistentes (Iborra, M.I. 2013).

3.3. Depuración de contaminantes emergentes

La depuración de aguas residuales tradicionalmente ha consistido en tratamientos como coagulación-floculación, sedimentación, desarenado, reactor biológico de fangos activos, entre otros que serán detallados más adelante. Las variadas propiedades físicas y químicas de los múltiples contaminantes emergentes hacen complejo su tratamiento, requiriendo de métodos y tecnologías avanzadas. Wert et al., 2005 realizó un estudio con 62 fármacos y productos de cuidado personal comunes demuestra que los tratamientos anteriores eliminan menos del 20% de los mismos, mientras que añadiendo tratamientos terciarios con carbón activo o con oxidación avanzada se pueden alcanzar rendimientos mayores al 80%.

Entre los tratamientos avanzados aptos, en principio, para eliminar estos contaminantes emergentes se incluyen: tecnologías de membranas, procesos biológicos con la variante de los biorreactores de membrana (MBR) y oxidación avanzada. Wintgens, et al., 2002 revela que una unidad de MBR sucedida por una unidad de adsorción con CAG puede alcanzar la depuración de más del 90% de algunos fármacos. Otro tratamiento posible es aquel que utilice oxidación avanzada con ozono y otros agentes oxidantes. Para alcanzar rendimientos similares al anterior, se requieren concentraciones de ozono iguales al valor de carbón orgánico disuelto, conllevando un coste económico elevado que cuestiona la viabilidad de los procesos de oxidación avanzada (AOP) (Petrovic, et al., 2003).

3.4. Depuración de aguas con carbón activo

El uso del carbón activo en la depuración de aguas residuales es conocido desde finales del siglo XIX, siendo ya entrado el siglo XX cuando en Estados Unidos ya se empieza a emplear en las plantas depuradoras industriales. Ha sido utilizado también para la eliminación de contaminantes provenientes de vertidos sobre las aguas superficiales afectadas en diferentes localidades (Prados Joyas, 2010).

Algunos ejemplos de estos vertidos a aguas superficiales tratados con carbón activo son:

- Incendio en un almacén de productos químicos (APQ) en septiembre de 2006 en Galicia.
- Incendio en un APQ en septiembre de 2008 en Galicia.
- Contaminación de pesticidas en embalses de Córdoba en julio de 2005.

Su uso representa una excelente alternativa para la depuración de compuestos persistentes presentes en las aguas residuales. Existe cierta incertidumbre sobre las interacciones implicadas en los procesos de adsorción, pero se ha llegado a concluir que el proceso sigue un modelo complejo con interacciones electrostáticas y dispersivas adsorbente-adsorbato, que la fortaleza de las interacciones entre enlaces dobles se puede modificar por los sustituyentes de los anillos aromáticos del adsorbato o del carbón activo y que el pH del medio desempeña un papel muy importante en el proceso de adsorción (Prados Joyas, 2010).

4. LEGISLACIÓN APLICABLE

A continuación, se enumera la legislación vigente que se debe tener en cuenta para el desarrollo del trabajo:

- Ley de Aguas, que viene especificada en la Ley 29/1985 del 2 de agosto.
- Reglamento del Dominio Público Hidráulico, que viene especificado en el Real Decreto 849/1986 de 11 de abril.
- Ley de Saneamiento de las Aguas Residuales, que viene especificada en la Ley 2/1992 de 26 de marzo de la Comunitat Valenciana.
- Directiva Europea sobre el Tratamiento de Aguas Residuales Urbanas, que viene especificado en la Directiva 91/271/CEE del 21 de mayo de 1991.
- Reglamento de la Reutilización de las Aguas Depuradas, que viene especificado en el Real Decreto 1620/2007 de 7 de diciembre.
- Reglamento de Almacenamiento de Productos Químicos y sus Instrucciones Técnicas Complementarias MIE APQ, que viene especificado en el Real Decreto RD 656/2017 del 23 de junio.

5. INTRODUCCIÓN TEÓRICA

5.1. Características de un agua residual urbana (ARU)

A continuación, se van a describir las características físicas, químicas y biológicas de un ARU más importantes.

5.1.1. Características físicas

Características de los sólidos

- *Sólidos totales (ST)*: La cantidad de sólidos totales en un agua residual se refiere a la cantidad de materia en fase sólida que se obtiene después de evaporar el agua en una estufa a 105 grados centígrados.
- *Sólidos sedimentables (SS)*: Se refiere a la cantidad de sólidos en un agua residual que, al introducir en un ensayo de cono Imhoff, ha sedimentado a los 30 minutos (ensayo V-30). Se expresa en ml sedimento/L. Constituyen una medida aproximada de la cantidad de fango que sedimentará en el proceso primario.
- *Sólidos en suspensión (SS)*: Corresponde la fracción no filtrable del sólido total, que se mide filtrando por fibra de vidrio.
- *Sólidos disueltos (SD)*: Corresponde a la fracción filtrable de los sólidos totales, que se componen por partículas de materia de tamaños entre 0,001 y 1 micra.

Aparte de la clasificación anterior, se podría también discernir entre los *sólidos volátiles (SV)*, que corresponde a la fracción orgánica, y los *sólidos no volátiles (SNV)*, que corresponden a la fracción inorgánica.

La temperatura del ARU dependerá de la estación y de las condiciones climatológicas, pudiendo variar en el año entre 10 y 21°C. También cabe destacar que el agua residual suele tener una temperatura ligeramente mayor al agua de suministro. Se puede considerar que no es un factor crítico al situarse por debajo de los 37°C. Sin embargo, es un factor importante ya que puede influir sobre el desarrollo de microorganismos, velocidades de reacción en los tratamientos y concentración de oxígeno en el agua.

La densidad se define como la masa por unidad de volumen, en unidades de kg/m³. El ARU convencional tiene una densidad prácticamente igual a la del agua a la misma temperatura. Es un parámetro relevante porque indica si algunos contaminantes sedimentarán o no.

La turbidez del ARU está directamente relacionada con la cantidad de sólidos en suspensión que hay en la misma. Estas partículas sólidas bloquearán la luz e impedirán que las plantas acuáticas puedan hacer fotosíntesis. Esto conllevará también una reducción en la cantidad de oxígeno disuelto en el agua. Se mide en NTU (Unidad Nefelométrica de Turbidez).

Características organolépticas

El color del agua residual urbana suele ser gris. Si se desarrollan, en gran parte, condiciones anaerobias, el color del agua residual cambia a gris oscuro para finalmente ser negro. En la mayoría de los casos, el color es debido a la formación de sulfuros metálicos por reacción del sulfuro liberado en condiciones anaerobias con los metales presentes en el agua residual.

El olor del agua residual urbana suele ser desagradable y se debe fundamentalmente a la descomposición de la materia orgánica presente en la misma. Las aguas residuales sépticas son las que mayor desagrado producen debido a la presencia de sulfuro de hidrógeno (tiene como olor característico el de huevos podridos) que se produce en las reacciones biológicas anaerobias.

5.1.2. Características químicas

A continuación, se van a presentar las características químicas más importantes como son la materia orgánica, el pH y alcalinidad y la materia inorgánica.

Materia orgánica

Dentro de la materia orgánica se encuentran las proteínas, hidratos de carbono, grasas y aceites. Pueden existir adicionalmente (aunque en pequeñas cantidades) moléculas orgánicas complejas como productos farmacéuticos, agentes tensoactivos, pesticidas y compuestos orgánicos volátiles.

Para la medición de la materia orgánica, existen tres métodos analíticos principales: demanda química de oxígeno (DQO), demanda bioquímica de oxígeno (DBO-5) y carbono orgánico total (COT). Cabe destacar que el COT es el método más empleado para cuantificar la materia orgánica cuando está en concentraciones muy bajas. La diferencia principal entre DQO y DBO-5 es que la primera mide la cantidad de oxígeno necesario para oxidar la materia orgánica por medios químicos y convertirla en dióxido de carbono y agua mientras que la segunda mide la cantidad de oxígeno que consumen los microorganismos en la degradación de la materia orgánica.

Se pueden correlacionar las medidas de DQO, DBO-5 y COT para hallar cocientes cuasi constantes cuya variabilidad vendrá mayoritariamente dada por el origen del agua residual, como se puede observar en la tabla 5.1. Para aguas residuales urbanas típicas, la relación DBO-5/DQO está entre 0,4-0,8. La relación DBO-5/COT está entre 1 y 2. Dicha relación proporciona una idea del nivel de contaminación en el agua.

Tabla 5.1: Relación entre DBO, DQO y COT para un residuo químico (Perry & Green, 2001).

DBO-5 (PPM)	DQO (PPM)	COT (PPM)	DBO- 5/DQO	DQO/COT	DBO- 5/COT
700	1.400	450	0,5	3,12	1,55
850	1.900	580	0,45	3,28	1,47
8.000	17.500	5.800	0,46	3,02	1,38
9.700	15.000	5.500	0,65	2,72	1,76
24.000	41.300	9.500	0,58	4,35	2,53
60.700	78.000	26.000	0,78	3,00	2,34

pH y alcalinidad

Las aguas residuales deben tener valores de pH entre 6 y 9 para que provoquen un mínimo impacto ambiental. Aquellas con pH inferior a 6 pueden ser corrosivas y aquellas con pH superior a 9 pueden ser incrustantes. La alcalinidad es importante para mantener los valores adecuados de pH, siendo el bicarbonato el tampón primario de las aguas residuales.

Materia inorgánica

La materia inorgánica en las aguas residuales está compuesta por: cloruros, carbonatos, nitrógeno, fósforo, azufre, compuestos tóxicos inorgánicos y metales pesados (trazas). Los cloruros en las aguas residuales provienen fundamentalmente del agua de origen y la incorporación posterior de unos 6g de cloruro en heces humanas por persona y día. Los carbonatos tienen su origen en la disolución por rocas en el agua de origen, y corresponde un componente crítico para mantener la alcalinidad del agua.

El nitrógeno y el fósforo (además del hierro en trazas) son compuestos críticos para la degradación de la materia orgánica. Las sales amoniacales o sales de nitrato son las fuentes típicas del nitrógeno, mientras que los fosfatos proporcionan el fósforo. Otros elementos importantes para la biodegradación (aunque en trazas) son el calcio, cobalto, molibdeno y el magnesio.

Sin embargo, estos nutrientes en cantidades elevadas, causan problemas importantes en el medio ambiente (existiendo legislación específica sobre la cantidad de vertido a zonas sensibles) como son la eutrofización, ya que provocan un aumento de la productividad biológica, disminuyendo así los niveles de oxígeno disuelto.

5.1.3. Características biológicas

A continuación, se van a presentar las características biológicas más importantes como son los organismos patógenos y la toxicidad.

Organismos patógenos

Los organismos patógenos en el agua residual provienen de los desechos humanos que, al incorporarse al agua, la contaminan. Las principales clases de organismos patógenos son las bacterias, los virus y los protozoos. Se debe controlar su presencia porque podrían causar enfermedades como el cólera, la disentería, la fiebre tifoidea e incluso hasta llegar a provocar la muerte de un ser humano.

Para conocer si el agua está infectada o no, se utilizan organismos indicadores. Por ejemplo, la presencia de bacterias coliformes podría indicar la presencia de microorganismos patógenos. Por el contrario, si al AR no contiene bacterias coliformes indicaría la ausencia de microorganismos patógenos.

Toxicidad

La toxicidad del agua residual urbana resulta importante ya que puede afectar tanto aguas arriba de la estación depuradora como aguas abajo. El análisis de la toxicidad se efectúa mediante bioensayos basados en un conjunto de organismos. Los bioensayos más comunes son: respirometría, luminiscencia del Adenosín Trifosfato (ATP), inhibición enzimática, nitrificación y el bioensayo con *Vibrio fischeri* (Dalzell, 2002)

La inhibición por nitrificación y *V. Fischeri* son los ensayos más sensibles, sin embargo, esto depende en el contaminante a medir y la mezcla. Lo más recomendable en estos ensayos es que durante su análisis de toxicidad, se realicen múltiples veces y no depender de un único resultado. (Dalzell, 2002)

5.1.4. Ejemplo de caracterización de un ARU.

El ARU se puede clasificar como débil, media o fuerte. Los constituyentes y sus concentraciones varían por hora y por día, inclusive pueden darse cambios por otras condiciones locales. Además de los constituyentes típicos establecidos en la tabla inferior y sus concentraciones, también son importantes otros tales como: calcio, cobre, magnesio, manganeso, cobalto y cinc. Así pues, también resulta importante determinar la presencia o ausencia de sulfuro de hidrógeno porque puede afectar a la concentración de los metales anteriores (en trazas) y estos resultan necesarios para el crecimiento de los microorganismos (CIDTA-USAL, 2018). En la tabla 5.2. se pueden observar los parámetros más comunes y valores de un agua residual típica.

Tabla 5.2.: Características típicas de un agua residual urbana (CIDTA-USAL, 2018).

Contaminantes	Unidades	Débil	Media	Fuerte
Sólidos totales	ppm	350	720	1200
<i>Disueltos</i>	ppm	250	500	850
No Volátiles	ppm	145	300	525
Volátiles	ppm	105	200	325
<i>Sólidos en suspensión</i>	ppm	100	220	350
No Volátiles	ppm	20	55	75
Volátiles	ppm	80	165	275
Sólidos sedimentables	ml/l	5	10	20
DBO-5	ppm	110	220	400
COT	ppm	80	160	290
DQO	ppm	250	500	1000
Nitrógeno	ppm	20	40	85
Amoníaco libre	ppm	12	25	50
Nitritos	ppm	0	0	0
Nitratos	ppm	0	0	0
Fósforo	ppm	4	8	15
Cloruros	ppm	30	50	100
Sulfato	ppm	20	30	50
Grasa	ppm	50	100	150
Coliformes totales	N/100 ml	106-107	107-108	107-109
COVs	µg/l	<100	100-400	>400

5.2. Tratamientos de ARU en una EDAR

A una estación depuradora de aguas residuales pueden llegar aguas de tres procedencias: domésticas, industriales y aguas pluviales. Las instalaciones se diseñan para un caudal punta máximo y en caso de superarse, el excedente de agua deberá verterse en los aliviaderos antes de su llegada a la EDAR. Por el contrario, ocurriría un colapso en la estación depuradora.

En una depuradora se clasifican los tratamientos en pretratamientos, tratamiento primario, tratamiento secundario y tratamiento terciario, como se puede observar en la figura 5.1

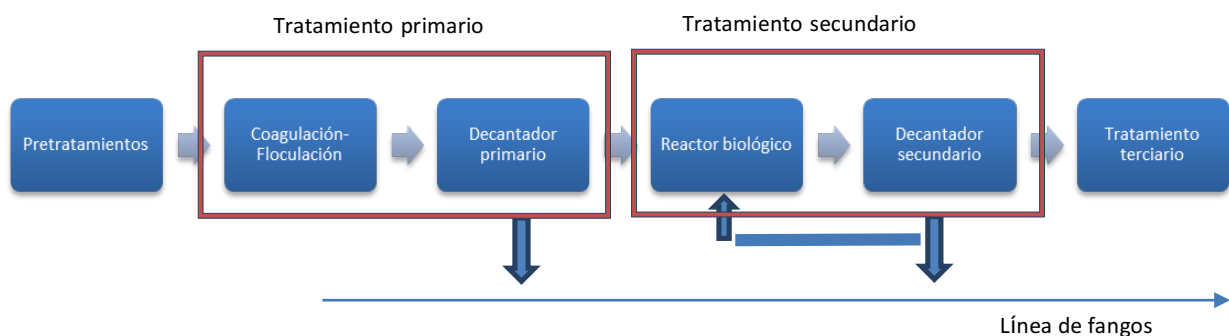


Figura 5.1.: Clasificación en cuatro grupos de la línea de aguas en una estación depuradora (Fuente: elaboración propia).

5.2.1. Pretratamiento

El pretratamiento busca eliminar sólidos de gran tamaño, arenas y grasas. Esto, además de ser el primer paso en la depuración del agua, sirve también para proteger los posteriores equipos del proceso. Las etapas son las siguientes:

Desbaste

El desbaste consiste en eliminar los sólidos de mayor tamaño que podrían estropear equipos debido a su morfología. Se consigue a través de rejillas y tamices. Las rejillas son dos: de sólidos gruesos y sólidos finos. Están constituidas por barros de hierro o acero, pudiendo estar horizontales o inclinados. Su limpieza (para evitar colmatación) se realiza de forma manual (con rastrillos) o automática (con una grúa giratoria). Los tamices son rejillas horizontales de acero, con una separación inferior a las rejillas (de 1 mm a 0,2 mm). Pueden ser estáticos o rotativos de limpieza automática.

Desarenado

Para eliminar la arena y cualquier otra partícula sólida de tamaño similar, se hace pasar el agua a través de un desarenador. Consiste en un ensanchamiento del canal, que, tomando en cuenta el balance de energía, disminuye la velocidad de paso y las partículas pueden sedimentar.

Posteriormente se realiza un lavado de la arena (para poder reutilizarla) para retirar la materia orgánica adherida. Otra forma de retirar dichos compuestos sería utilizar desarenadores aireados, que limpien completamente la arena y evite requerir lavados inyectando aire mediante difusores.

Desengrasado

El desengrasado se realiza de forma simultánea al desarenado, aprovechando la reducción de velocidad, los aceites al tener menor densidad que el agua flotarán en la superficie. Así pues, se retiran en la superficie del agua mediante rastrillas.

5.2.2. Tratamiento primario

El tratamiento primario tiene como objetivo eliminar los sólidos en suspensión del agua residual, para ello se utilizan métodos físicos y químicos (como la coagulación-floculación, que es un proceso físico-químico y la sedimentación, que es un proceso físico). Estos procesos son:

Coagulación-floculación

La coagulación-floculación son dos procesos que consiguen crear agregados de partículas más grandes para agilizar su sedimentación. Primero, la coagulación busca neutralizar las cargas eléctricas de las partículas utilizando sales de aluminio o hierro (cloruro férrico, sulfato de aluminio, entre otros...). La floculación tiene como objetivo crear agregados de partículas neutralizadas más pesadas para facilitar su sedimentación, esto se consigue con una agitación lenta y además utilizando floculantes (principalmente polielectrolitos) para enlazar las partículas.

Decantador primario

El decantador primario es un depósito cilíndrico que tiene como objetivo la sedimentación de las partículas sólidas y que no están disueltas en el agua. Pueden ser estáticos o dinámicos. Los estáticos no tienen elementos móviles para la retirada del fango, suelen ser cilíndrico-cónicos para facilitar la retirada del fango y solamente se emplean para caudales pequeños. Los dinámicos poseen elementos móviles para facilitar la retirada del fango, usualmente unas rasquetas de gran tamaño. Estos son los empleados para caudales grandes y pueden tener geometría circular o rectangular.

Balsas de homogeneización-neutralización

La función de esta etapa es llevar el agua residual a unos depósitos en los cuales se busca homogeneizar y neutralizar antes de llegar al tratamiento secundario. Para la neutralización se suelen utilizar compuestos químicos tales como: ácido nítrico, ácido sulfúrico y sosa cáustica.

5.2.3. Tratamiento secundario

El objetivo del tratamiento secundario es disminuir la materia orgánica biodegradable y disuelta en el agua residual urbana, para ello se utilizan microorganismos, que en este caso se denominan fangos activos. Estos procesos pueden ser aerobios (en presencia de oxígeno) o anaerobios (en ausencia de oxígeno).

Reactor biológico

En el reactor biológico se lleva a cabo la disminución de DBO del agua residual, para ello se utilizan fangos activos. Los fangos activos son cultivos bacterianos que se alimentan de la carga orgánica del agua en presencia de oxígeno. Por ello, debe haber aireación. El oxígeno se proporciona al reactor mediante difusores dispuestos al fondo del reactor, además de contar con agitadores para aumentar la turbulencia. El parámetro de diseño de estas instalaciones es la relación entre la carga orgánica contenida en el agua alimento y la concentración de microorganismos.

Decantador secundario

El decantador secundario tiene como objetivo separar el agua depurada de los fangos. Parte de los fangos que decantan se recirculan al reactor biológico para mantener la concentración adecuada de los mismos. El resto se lleva a la línea de fangos para su tratamiento. El clarificado se retira a través de unas canaletas en la superficie del decantador, que pasará a los tratamientos terciarios.

5.2.4. Tratamiento terciario

El tratamiento terciario representa el último eslabón dentro de la depuración de aguas residuales. Su objetivo es eliminar contaminantes específicos que puedan existir en ciertas aguas residuales. Sin embargo, son tratamientos caros que se aplican en casos especiales o para contaminantes peligrosos. Según la Directiva 91/271/CEE, de 1991, la depuración de nitrógeno y fósforo es necesaria únicamente cuando el vertido de agua residual se efectúe a una zona sensible de eutrofización. Además de esto, existen otros procesos para eliminar contaminantes específicos como son: adsorción, intercambio iónico, membranas y oxidación avanzada.

Eliminación de nutrientes: Nitrógeno y fósforo

La eliminación de nitrógeno se efectúa mediante tratamientos biológicos, en condiciones anaerobias en las cuales los microorganismos reducen los nitratos a nitrógeno gaseoso. El nitrógeno se encuentra en fase amoniacal dentro del agua residual, por ello se debe primero oxidar en un tratamiento aerobio antes de la desnitrificación.

El fósforo se puede eliminar con tratamientos químicos o biológicos. El procedimiento químico consiste en precipitarlo en el decantador secundario añadiendo cloruro férrico. El procedimiento biológico consiste en un reactor anaerobio previo al reactor biológico (aerobio) para que los microorganismos liberen fósforo que, al pasar a condiciones aerobias, captarán en mayor cantidad. Se eliminará del agua residual y pasará a la línea de fangos.

Adsorción

La adsorción es el proceso que permite retener los compuestos sobre una superficie (adsorbente). Existe gran variedad de adsorbentes, entre ellos están: gel de sílice, alúmina, zeolitas y carbón activo. El último es el más económico y el más utilizado.

Intercambio iónico

El intercambio iónico es un tratamiento que permite eliminar iones del agua residual (las resinas empleadas para dicho tratamiento pueden ser aniónicas o catiónicas). Se utilizan principalmente para la obtención de aguas de gran pureza.

Membranas

Las membranas son materiales porosos de origen orgánico o inorgánico que, dependiendo de su tamaño de poro, permiten eliminar diferentes compuestos desde bacterias y proteínas hasta iones como cloruros. Se clasifican, de mayor a menor tamaño de molécula que separan: microfiltración, ultrafiltración, nanofiltración y ósmosis inversa.

Oxidación avanzada

La oxidación avanzada consiste fundamentalmente en degradar moléculas contaminantes orgánicas hasta CO_2 (u otros compuestos menos contaminantes). Los compuestos oxidantes más utilizados son: ozono, peróxido de hidrógeno, radiación UV y oxígeno a altas presiones y temperaturas.

5.3. Tratamiento con carbón activo (CA)

A continuación, se busca introducir los fundamentos de adsorción y la definición de carbón activo, además de los diferentes tipos que existen y sus características más importantes.

5.3.1. Adsorción y fundamentos. Definición de carbón activo.

El fenómeno de adsorción es conocido desde la antigüedad, materiales como arcilla, arena y madera quemada fueron utilizados por los egipcios, romanos y griegos para aplicaciones tales como: desalinizar aguas, depuración de grasas y tratamiento de múltiples enfermedades (Rouquerol, et al., 2013).

Se trata de la acumulación o, en su caso, retención de un compuesto sobre una superficie sólida (generalmente porosa y heterogénea con superficie específica elevada). Existen dos procesos asociados a la adsorción y estos son: quimisorción (generar enlaces químicos) y fisorción (fuerzas de Van der Waals). En la tabla 5.3 se realiza una primera clasificación de los adsorbentes más comunes en el mercado.

Tabla 5.3.: Primera clasificación de adsorbentes comunes (Perry & Green, 2001).

	Amorfo	Estructurado
Hidrófobo	Carbón activo, polímeros	Tamices de carbón, silicalita
Hidrófilo	Gel de sílice, alúmina activada	Zeolitas comunes, modernita, chabazita

Para caracterizar el equilibrio de adsorción, se utilizan isothermas que relacionan la concentración de la fase adsorbida y la presión. Se han modelado para superficies planas y también para poros llenos.

Isothermas

La isoterma más sencilla es la **isoterma lineal**, que representa la Ley de Henry. La ecuación de dicha recta queda representada en la Ec.1:

$$n = K * c \quad \text{Ec. 1}$$

Donde K es una constante, n es la concentración en la fase sólida y c es la concentración en la fase líquida. Las leyes termodinámicas requieren que todas las isothermas presenten un límite lineal.

La **isoterma de Langmuir** es una isoterma ampliamente utilizada para caracterizar una superficie homogénea plana. La ecuación de dicha isoterma queda representada en la Ec.2:

$$\theta_A = \frac{c}{c_m} = \frac{K_A^{eq} c}{1 + K_A^{eq} c} \quad \text{Ec. 2}$$

Donde, θ_A es el grado de recubrimiento del adsorbente, que es equivalente al cociente entre la concentración de la fase adsorbida C , y la capacidad de la monocapa que se estima para grandes concentraciones C_m y K_A^{eq} es una constante de equilibrio de adsorción.

El modelo parte de las siguientes suposiciones:

- El adsorbente tiene superficie homogénea con un número de sitios equivalentes entre sí que forman una monocapa.
- Sobre cada sitio se adsorbe una única molécula.
- Las moléculas adsorbidas no interaccionan entre ellas.

Para determinar los parámetros característicos, es frecuente realizar una linealización de la ecuación (2). La linealización de dicha isoterma queda representada en la Ec. 3:

$$\frac{1}{\theta_A} = \frac{1}{K_A^{eq} C_f} + 1 \quad \text{Ec. 3}$$

Además, se puede calcular la capacidad de la monocapa C_m mediante la linealización observada en la Ec. 4:

$$\frac{1}{C} = \frac{1}{K_A^{eq} C_m C_f} + \frac{1}{C_m} \quad \text{Ec. 4}$$

Donde la ordenada en el origen proporciona la C_m y la pendiente permite calcular la K_A^{eq} .

Entre las desventajas que presenta este modelo están: que se desprecian las interacciones intramoleculares, que se estima la formación de una única monocapa y que se desprecia la heterogeneidad de los sitios y su rugosidad. Existen diferentes modificaciones sobre la isoterma de Langmuir que intentan mejorar estas cuestiones, como son: Freundlich, Toth, Radke-Prausnitz, Sips, BET y UNILAN (Perry & Green, 2001).

La **isoterma de Freundlich** es una isoterma clásica empírica para el equilibrio de adsorción de una superficie heterogénea plana. La ecuación de dicha isoterma queda representada en la Ec.5:

$$\theta_A = \frac{x}{m} = K \cdot c^{1/n} \quad \text{Ec. 5}$$

Donde x es la masa adsorbida, m la masa del adsorbente y K y n son constantes. La isoterma aproxima los sitios activos a una distribución exponencial de la energía de adsorción.

Se pueden calcular los parámetros mediante la linealización que se observa en la Ec. 6:

$$\log(\theta_A) = \log\left(\frac{x}{m}\right) = \log(K) + \frac{1}{n} \log(c) \quad \text{Ec. 6}$$

5.3.2. Tipos de carbón activo.

El carbón activo es una materia carbonosa (de procedencia orgánica o inorgánica variada) que, dependiendo del tipo de activación, ha pasado por una oxidación con CO_2 , aire, reacción con ácido fosfórico a alta temperatura, entre otros tipos de activación con el objetivo de aumentar su porosidad. Su morfología típica puede ser granular (CAG) o en polvo (CAP), diferenciándose por su tamaño de partícula. El granular presenta un tamaño de partícula superior a 0,25 mm. El carbón activo en polvo presenta tamaños menores a 0,25 mm.

A su vez, el carbón activo granular se puede clasificar en no estructurado y estructurado. El estructurado, o con forma específica, puede presentar morfología cilíndrica, esferas, entre otros. El carbón activo, al tratarse de un adsorbente amorfo, se puede caracterizar además por su tamaño de poro. En la tabla 5.4. se puede observar la clasificación del carbón activo en función de su tamaño de poro y su función.

Tabla 5.4. : Clasificación de los tamaños de poros (Perry & Green, 2001).

Tipo	Diámetro de poro	Características
Microporo	Diámetro (d) < 2 nm	Donde ocurre la adsorción de la molécula al sitio activo
Mesoporo	2 nm < d < 50 nm	Ocurre condensación capilar: lazo de histéresis
Macroporo	d > 50 nm	Difusión de la molécula dentro del adsorbente

En la figura 5.2. se observa la morfología de los poros para un carbón activo preparado a partir de lodos avícolas secos y activado mediante adición de ácido fosfórico. La imagen está realizada con microscopía de barrido electrónico (SEM) con una resolución de 5000x (figura 5.2. a) y 50000x (figura 5.2. b). Se observa una estructura heterogénea, con una gran cantidad de micro y mesoporos con tamaños que van de 0,05 nm hasta 0,01 nm. Se aprecian también algunos poros de cuerpos anchos y accesos estrechos (Jorge Luis, et al., 2016).

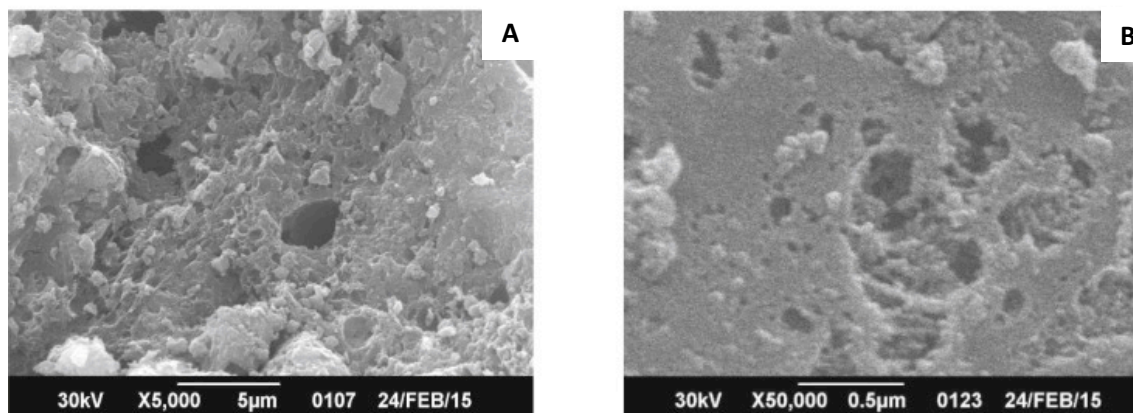


Figura 5.2.: Microfotografía de la estructura externa del carbón CLA mediante la técnica SEM, A) imagen CLA-5000X y B) imagen CLA- 50000X (Jorge Luis, et al., 2016).

Para la fabricación del carbón activo se utilizan varios materiales de partida, como pueden ser conchas, maderas, cáscaras de nuez, coco, turba, lignito, carbones bituminosos, lodos industriales, etc. Las propiedades físicas de algunos adsorbentes de tipo carbón activado se establecen en la tabla 5.5.

Tabla 5.5.: Propiedades físicas de adsorbentes de carbón (Perry & Green, 2001).

Origen del carbón activado	Forma de las partículas	Porosidad interna (%)	Densidad seca aparente (kg/l)	Diámetro medio de los poros (nm)	Superficie específica (m ² /g)	Capacidad de adsorción (kg/kg seco)
Conchas	Granular	60	0,45-0,55	2	800-1600	0,40
Maderas	Granular	80	0,25-0,30		800-1800	0,70
Petróleo	Granular y cilíndrica	80	0,45-0,55	2	900-1300	0,30-0,40
Turba	Granular, cilíndrica y polvo	55	0,30-0,50	1-4	800-1600	0,50
Lignito	Granular y polvo	70-85	0,40-0,70	3	400-700	0,30
Carbones bituminosos	Granular y polvo	60-80	0,40-0,60	2-4	900-1200	0,40

En la Tabla 5.5. se puede observar que el carbón activo tiene excelentes propiedades de adsorbente por su alta porosidad interna y por tener una superficie específica muy elevada con respecto a adsorbentes de otros orígenes (como alúminas, silicatos y polímeros orgánicos).

5.4. Fármacos presentes en las AR como contaminantes emergentes.

5.4.1. El mercado farmacéutico

Entiéndase el mercado farmacéutico como el responsable de la investigación y desarrollo, producción y comercialización de todo tipo de productos para la salud. El mercado global supera el billón de dólares. En 2016 este sector presentó unos ingresos de 1,105 billones de dólares, casi triplicando los 390 billones de 2001. Las predicciones estiman que para 2022 esta cifra supere los 1,4 billones de dólares (The Statistics Portal, 2016).

Estados Unidos representa la mayor parte de la cifra de negocio. Por empresas, la multinacional americana Pfizer es la más grande. Otras empresas importantes son: Johnson&Johnson, Merck, Novartis, Roche, GSK, AstraZeneca y Sanofi. El sector farmacéutico invierte gran parte de sus ingresos en innovación y desarrollo, siendo este el pilar de su negocio. Europa representa el 21,5% de las ventas mundiales de fármacos (EFPIA - European Federation of Pharmaceutical Industries and Organizations, 2017).

En España, el mercado farmacéutico representa 15.213 millones de euros, de los cuales 10.645 representan exportaciones. Cuenta con 400.000 trabajadores a través de 212 empresas nacionales y multinacionales, siendo 93% con empleo indefinido y de alta cualificación. Además, es líder industrial en investigación y desarrollo con 1.085 millones de euros invertidos en i+D en 2016 (Fernández & González, 2017).

Tabla 5.6.: Evolución del consumo de productos farmacéuticos por número de prescripciones (Proyecto EVITECFA, 2013).

AÑO	2006	2007	2008	2009	2010	2011	2012	2013	2014	2015	2016
Consumo en miles de unidades	796.019	843.367	890.040	934.002	957.695	973.212	913.696	859.232	868.618	882.098	896.851

En la tabla 5.6. se observa la evolución en España de consumo de productos farmacéuticos por prescripción médica. Aunque en los años de la crisis económica se observa una disminución, se observa en la figura 5.3. una tendencia al aumento para los próximos años.

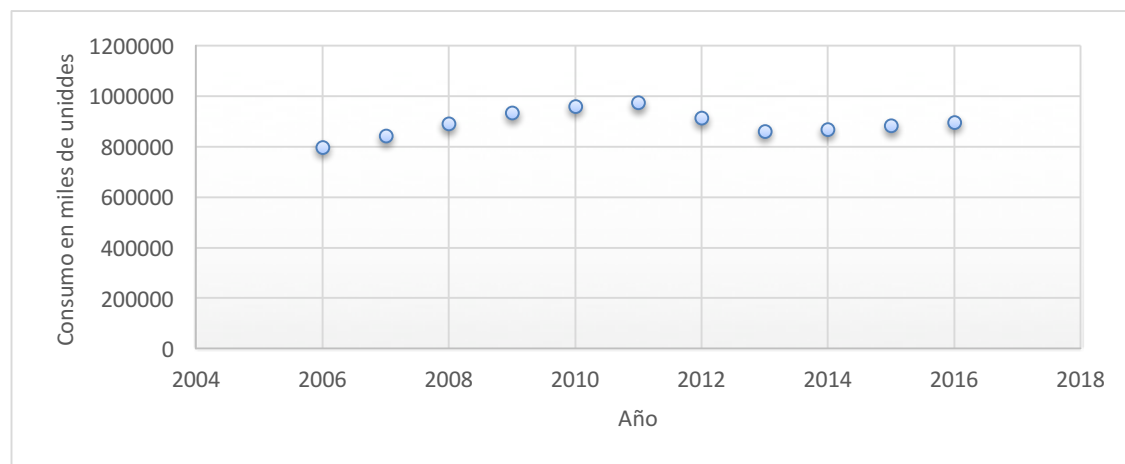


Figura 5.3.: Evolución del consumo de productos farmacéuticos por número de prescripciones (Proyecto EVITECFA, 2013).

Este aumento en el consumo nacional de prescripciones farmacéuticas ha incrementado su presencia en las aguas residuales, intensificando la preocupación sobre el efecto que su introducción pueda tener

en el medio ambiente. Sin embargo, se espera que el mayor crecimiento en consumo de productos farmacéuticos venga de países en desarrollo y que en los países industrializados tradicionales el aumento sea modesto (Montes Perales, 2016).

5.4.2. Clasificación de fármacos. Fármacos en las aguas residuales

Se define fármaco como una sustancia química que tiene una acción biológica que puede ser aprovechable o no para fines terapéuticos. Si estos efectos son positivos y se pueden cuantificar, se denomina medicamento. Además de poderse diferenciar por su nombre molecular según la IUPAC, se pueden clasificar las sustancias farmacológicas según grupos terapéuticos (Cabildo Miranda, 2017). A este sistema se le denomina ATC, que se estructura en cinco niveles. Por ejemplo, el diazepam se clasifica con el código N 05 B A 01:

- Nivel 1: Órgano o sistema de actuación. N: Sistema nervioso
- Nivel 2: Subgrupo terapéutico. 05: Psicofármacos
- Nivel 3: Subgrupo terapéutico o farmacológico. B: Ansiolíticos
- Nivel 4: Subgrupo terapéutico, farmacológico o químico. A: Derivados benzodiazepínicos
- Nivel 5: Nombre del principio activo. 01: Diazepam

Se han detectado más de 600 sustancias farmacéuticas activas (o sus productos de transformación) en el medio ambiente que pertenecen a distintos grupos terapéuticos de especial relevancia que se pueden observar en la figura 5.4.

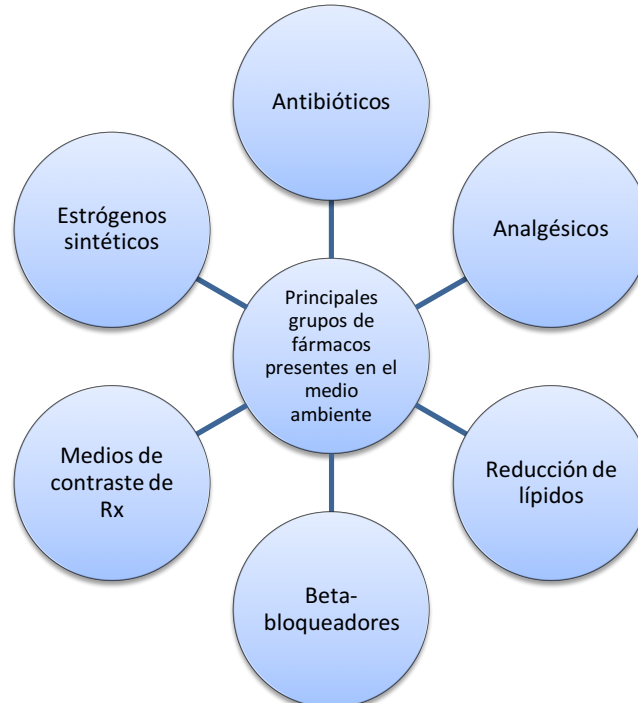


Figura 5.4.: Principales grupos terapéuticos presentes en el medio ambiente (Hickmann, et al., 2014).

En la tabla 5.7. se puede observar la ocurrencia, en número de países, de los principales fármacos presentes en el medioambiente. Según un estudio, la presencia de fármacos en ríos y lagos receptores

de aguas residuales puede oscilar entre 0,1 µg/L y 1 µg/L. Pudiendo ser mayores en áreas pobladas o en las cercanías de las plantas de tratamiento. En España, se han detectado casi 200 fármacos en aguas superficiales, freáticas, corrientes o potables (Hickmann, et al., 2014).

Tabla 5.7.: Algunos fármacos comerciales detectados en el medio acuático y cantidad de países (Hickmann, et al., 2014).

Fármaco	Grupo terapéutico	Número de países donde se han detectado fármacos en el agua
Carbamazepina	Antiepilépticos	48
Ibuprofeno	Analgésicos	47
Naproxeno	Analgésicos	45
Acetaminofén	Analgésicos	29
Diclofenaco	Analgésicos	50
Sulfametoxazol	Antibióticos	47
Trimetoprima	Antibióticos	29
Estrona	Estrógenos	35
Estriol	Estrógenos	15

Las plantas depuradoras de aguas residuales convencionales no se encuentran preparadas para depurar los productos farmacéuticos y esto conlleva su vertido posterior al cauce receptor e inclusive a las aguas de riego. En estudios realizados a partir del análisis de diversos fármacos en cinco depuradoras de aguas residuales urbanas de Cataluña, se detectaron los valores medios a la entrada y salida de depuradora que se observan en la tabla 5.8.

Tabla 5.8.: Concentraciones de compuestos farmacéuticos a la entrada y salida de depuradora
(Petrovic, et al., 2011).

Grupo terapéutico	Compuesto	EDAR (ng/l)	EDAR (ng/l)
		Entrada	Salida
Analgésicos y antiinflamatorios	Ketoprofeno	451	318
	Naproxeno	99	108
	Ibuprofeno	516	266
	Diclofenac	250	215
	Acetaminofén	10194	2102
Antilipemiantes	Ácido clofíbrico	72	28
	Gemfibrozil	155	120
	Bezafibrato	23	10
Antiepilépticos	Carbamazepina	420	410
Antiulcerosos	Ranitidina	188	135
Antibióticos	Azitromicina	152	96
	Sulfametoxazol	590	390
	Trimetropina	1172	290
Beta bloqueantes	Atenolol	400	395
	Sotalol	185	167
	Propanolol	290	168

En el caso de compuestos como la carbamazepina, el naproxeno o el diclofenaco se observa que no hay disminución alguna en los tratamientos de depuración. En casos como el ibuprofeno o el acetaminofén si se observa una disminución de concentración importante, aunque en el caso del ibuprofeno se desconocen los efectos tóxicos de los productos de degradación.

5.4.3. Características de fármacos

En el presente trabajo se realizó el estudio de la adsorción y el diseño de la instalación a partir del análisis de cinco fármacos: cafeína, carbamazepina, diazepam, ibuprofeno y acetaminofén

Cafeína

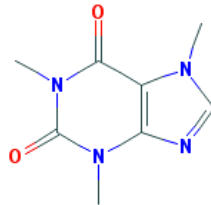


Figura 5.5.: Estructura molecular en 2D de la cafeína (*National Center for Biotechnology Information, s.f.*).

La cafeína es un estimulante del sistema nervioso, que despierta y produce agitación. Es la sustancia estimulante más consumida del mundo. Además de estimular el músculo cardíaco puede resultar útil para tratar algunos tipos de dolores de cabeza. Se trata de una metilxantina, sólido soluble en agua de color blanco y con sabor amargo. (National Center for Biotechnology Information, s.f.)

- Peso molecular: 194,194 g/mol
- Punto de sublimación: 178 °C
- Punto de fusión: 238°C
- Solubilidad en agua: 21,6 g/L a 25 °C
- Densidad: 1,23 g/mL
- DL50 : 192 mg/kg
- Fórmula molecular: C₈H₁₀N₄O₂

Carbamazepina

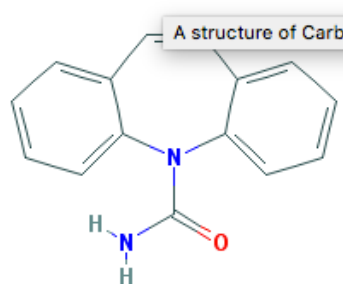


Figura 5.6.: Estructura molecular en 2D de la carbamazepina (*National Center for Biotechnology Information, s.f.*).

La carbamazepina es un anticonvulsivo utilizado para epilepsias y problemas psicomotores. Su modo de acción es poco conocido. Se trata de un compuesto tricíclico típico de los Antidepresivos

Tricíclicos (ATC) con propiedades analgésicas, sólido de color blanco y muy poco soluble en agua. (National Center for Biotechnology Information, s.f.).

- Peso molecular: 236,274 g/mol
- Punto de fusión: 190,2°C
- Solubilidad en agua: 17,7 mg/L
- Fórmula molecular: C₁₅H₁₂N₂O

Diazepan

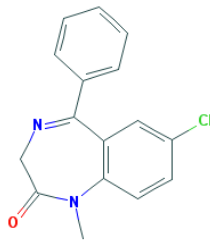


Figura 5.7.: Estructura molecular en 2D del diazepam (National Center for Biotechnology Information, s.f.)

El diazepam es un benzodiazepino con propiedades anticonvulsiantes, ansiolíticas, relajante muscular y con una duración de acción prolongada. Se trata de un sólido poco soluble en agua de color blanco amarillento, sin olor y algo amargo. (National Center for Biotechnology Information, s.f.)

- Peso molecular: 284,743 g/mol
- Punto de fusión: 125,5°C
- Solubilidad en agua: 50 mg/L a 25°C
- Fórmula molecular: C₁₆H₁₃ClN₂O
- DL₅₀ : 1240 mg/kg en ratas

Ibuprofeno

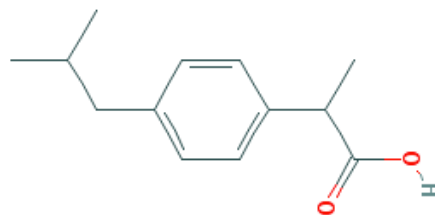


Figura 5.8.: Estructura molecular en 2D del ibuprofeno (National Center for Biotechnology Information, s.f.).

El ibuprofeno es un ácido propiónico derivado con efectos antiinflamatorios, analgésicos y antipiréticos. Se trata de un fármaco con propiedades analgésicas utilizado en la terapia de reumatismo y artritis, generalmente seguro y tolerable, aunque en raras ocasiones puede ocasionar daño hepático grave. Se trata de un sólido transparente, con un olor característico y poco soluble en

agua, aunque muy soluble en la mayoría de disolventes orgánicos. (National Center for Biotechnology Information, s.f.)

- Peso molecular: 206,285 g/mol
- Punto de fusión: 76°C
- Solubilidad en agua: 21 mg/L a 25°C
- Fórmula molecular: C₁₃H₁₈O₂

Acetaminofén

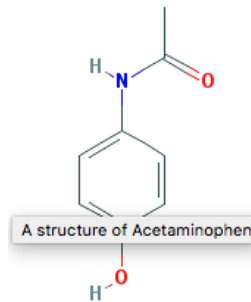


Figura 5.9.: Estructura molecular en 2D del acetaminofén (National Center for Biotechnology Information, s.f.).

El acetaminofén es un analgésico y antipirético derivado de acetanilida. El mecanismo exacto de su acción aún no ha sido totalmente determinado. En dosis bajas resulta seguro, pero con sobredosis puede causar daño hepático grave e inclusive la muerte. Se trata de un sólido cristalino soluble en agua, blanco sin olor y con sabor amargo (National Center for Biotechnology Information, s.f.).

- Peso molecular: 151,165 g/mol
- Punto de ebullición: >500 °C
- Punto de fusión: 168°C
- Solubilidad en agua: 14 g/L a 25 °C
- Densidad: 1,26 g/mL
- Fórmula molecular: C₈H₉NO₂

5.4.4. Cinética de un lecho de adsorción fijo

Treybal, 1980 describe la onda de adsorción para una columna con lecho fijo teórica observada en la figura 5.10., en la cual se aprecia en función del tiempo como existe una zona de adsorción dinámica, que para un instante determinado llega a un punto de quiebre en el cual la concentración a la salida aumenta bruscamente y se alcanza el equilibrio rápidamente.

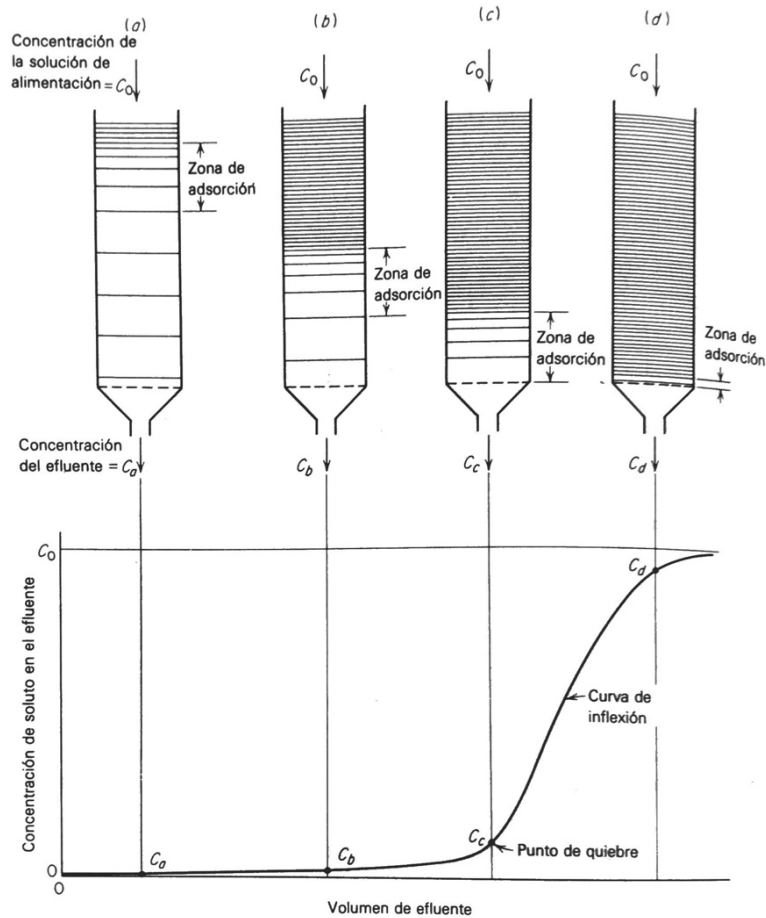


Figura 5.10.: Onda típica de adsorción para una columna con lecho fijo (Treybal, 1980).

Para un proceso de adsorción ideal e infinitamente rápido, la onda sería una función escalón, donde el escalón se produciría en el tiempo de ruptura. Sin embargo, las ondas de adsorción suelen tener una forma de S, debido a múltiples efectos. Es por ello que en los siguientes ensayos se calculó la eficacia de la columna \varnothing como el cociente entre el área de la onda de adsorción experimental y el área de la función escalón para la misma onda. Se observa en la ecuación 7.

$$\varnothing = \frac{\text{Área onda experimental}}{\text{Área onda escalón teórica}} = \frac{\int_{V_{0,02}}^{V_{0,9}} (C_0 - C) dV}{(V_{0,9} - V_{0,02})C_0} \quad \text{Ec. 7}$$

Donde \varnothing representa la eficacia de la columna, si la curva de la función es suave, el valor de la eficacia será pequeño. Por lo contrario, si la función presenta un cambio abrupto, el valor de la eficacia será mayor o igual que 1. $V_{0,9}$ y $V_{0,02}$ corresponden al volumen que ha pasado de líquido a través de la columna para $C/C_0 = 0,9$ y $0,02$ respectivamente.

Una vez conocida la eficacia de la columna, se puede proceder a calcular la altura de la zona de transferencia de materia (H_{ZTM}) mediante la ecuación 8:

$$H_{ZTM} = H \frac{V_{0,9} - V_{0,02}}{V_{0,9} - (1 - \varnothing)V_{0,02}} \quad \text{Ec. 8}$$

Donde H es la altura de la columna de adsorción. Para conocer adicionalmente la velocidad del lecho de adsorción R, que posteriormente será un parámetro de diseño para el escalado industrial, se hace uso de la expresión 9:

$$R = \frac{H_{ZTM}Q}{V_{0,9} - V_{0,02}} \quad \text{Ec. 9}$$

6. METODOLOGÍA EXPERIMENTAL

En el siguiente capítulo se va a exponer toda la metodología analítica utilizada en el estudio y la planta piloto diseñada.

6.1. Materiales. Tipos de carbón activo empleados.

El carbón activo comercial utilizado es el Chiemivall MG1050 8x30. Se trata de un carbón activo granular activado térmicamente con vapor. Puede además ser sometido a sucesivos procesos de reactivación. Es adecuado para columnas de lecho fijo o lecho móvil. Es efectivo tanto para potabilización de aguas como para tratamiento de aguas residuales, especialmente se utiliza tanto para decoloración de agua como para tratamientos terciarios.

- Área específica: 1.100 m²/g
- Densidad aparente: 440 + 30 kg/m³
- Diámetro medio de partícula: 1,0 mm
- Dureza: 90%

Además, se ha estudiado carbón activo agotado de planta potabilizadora de aguas.

Para el estudio analítico del comportamiento del carbón activo a distintas concentraciones de fármacos (Jar-Test), se ha hecho uso del siguiente material:

- Balanza de precisión marca KERN AEJ
- Espátula pequeña de acero inoxidable
- Vidrio de reloj
- Envases de vidrio borosilicatado de 1000 mL y 500 mL
- Vasos de precipitado de 1000 mL
- Matraces aforados de 1000 mL y 500 mL
- Jeringas de 10 mL
- Viales de vidrio para muestra de 20 mL
- Filtros de jeringa de 0,45 micras

Para el análisis de muestras con TOC se ha hecho uso del siguiente material:

- Equipo TOC-L marca SHIMADZU con auto-sampler
- Viales de muestra de 40 mL

Para el análisis de muestras con HPLC se ha hecho uso del siguiente material:

- Equipo HPLC marca JASCO
- Metanol ultra puro para HPLC marca VWR Chemicals
- Agua ultra pura para HPLC marca VWR Chemicals
- Microjeringa de 100 μ L
- Viales de 2 mL de muestra
- Micropipetas y puntas
- Agitador de muestras

6.2. Preparación de las disoluciones sintéticas de fármacos.

Para las diferentes experiencias realizadas primeramente fueron preparadas disoluciones de partida de 1 L con una concentración de 10 mg/L de cada fármaco (Anexo 13.1). Los fármacos tienen las siguientes procedencias:

- Acetaminofén (Sigma-Aldrich USA).
- Ibuprofeno (pastillas de 600 mg marca CINFA).
- Cafeína (Panreac).
- Carbamazepina (Sigma-Aldrich USA).
- Diazepan (pastillas de 5 mg marca CINFA).

Dichas disoluciones fueron introducidas en nevera protegidas de la luz con papel de aluminio. Posteriormente para el Jar-Test con cada fármaco, fueron preparadas 6 disoluciones de 500 mL a estas concentraciones: 0,5, 1, 1,5, 2, 2,5 y 3 mg/L. Para el cálculo de las cantidades a añadir en cada dilución para alcanzar la concentración deseada se hace uso de la ecuación 7:

$$V_1 C_1 = V_2 C_2 \quad \text{Ec. 5}$$

Donde V_1 es el volumen inicial, C_1 es la concentración inicial, V_2 el volumen final y C_2 la concentración final deseada.

6.3. Descripción de la columna de adsorción diseñada.

La planta piloto consta de una columna de adsorción rellena con carbón activo granular. Dicha columna está compuesta por una bureta, con un soporte inferior de goma, unas perlas de vidrio, un trozo de fibra de un material asimilable al estropajo, el carbón activo granular y una rejilla metálica circular. Estos elementos se pueden observar en la figura 6.1.

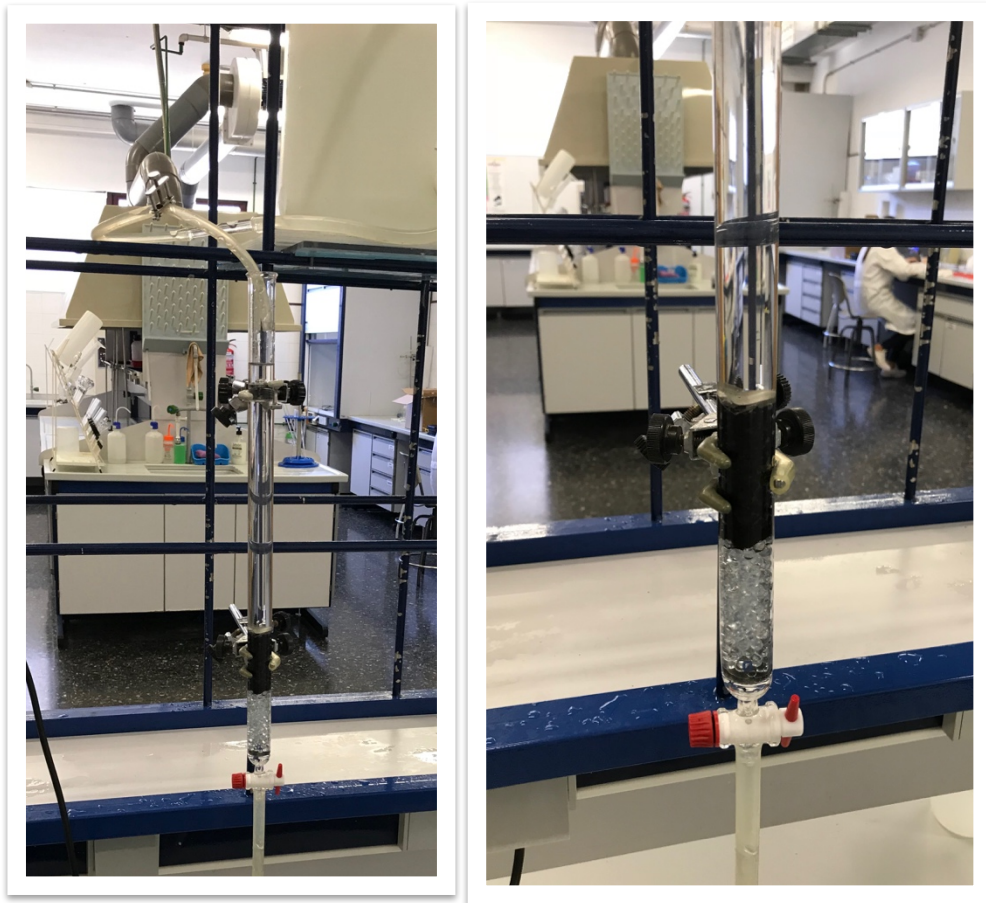


Figura 6.1.: Fotografía de la columna de adsorción diseñada y detalle.

Los otros elementos auxiliares que precisa la planta son: un depósito de 25L situado en la parte superior del montaje, conducciones de plástico y una pinza Mohr que sirve para regular el caudal de forma precisa. En la figura 6.2. se puede observar una fotografía de todos los elementos de la planta piloto diseñada.

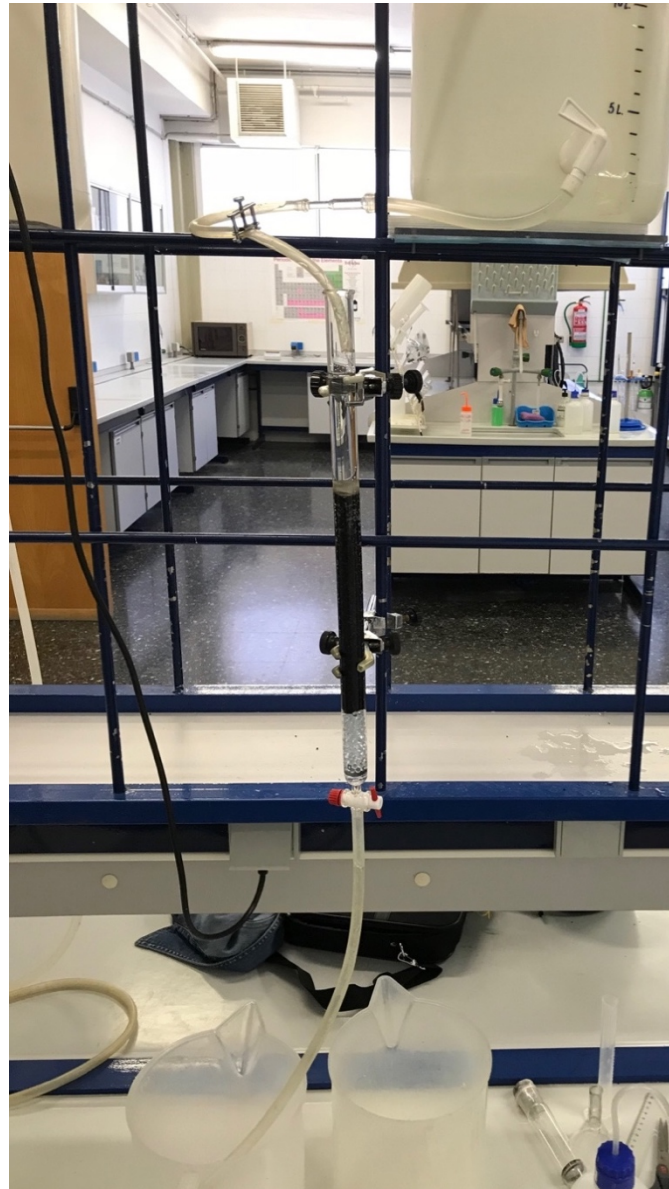


Figura 6.2.: Fotografía de la planta piloto diseñada.

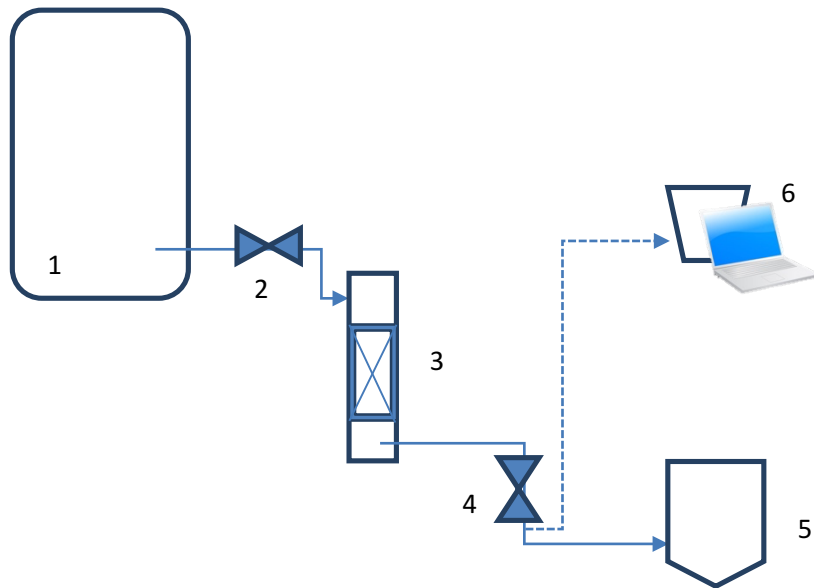


Figura 6.3: Esquema de la planta piloto diseñada.

En la figura 6.3 se puede observar un esquema de la planta piloto diseñada y sus elementos numerados. Estos elementos corresponden con los siguientes equipos:

- | | |
|---|--|
| 1. Depósito en altura de 25 L | 2. Válvula tipo pinza Mohr |
| 3. Bureta con carbón activo granular en lecho adsorbente fijo | 4. Válvula de regulación de la bureta |
| 5. Contenedor de recogida del agua de salida | 6. Recogedor de muestras y adquisición de datos. |

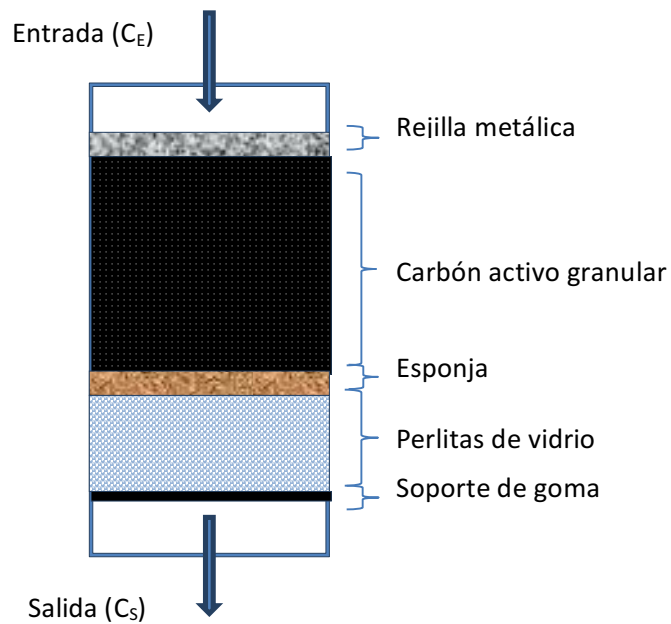


Figura 6.4: Detalle de los elementos de la columna de adsorción.

6.4. Descripción de las experiencias

A continuación, se van a describir las experiencias realizadas dentro de la metodología experimental, primero obteniendo las isotermas mediante Jar-Test y posteriormente realizando ensayos con la planta piloto desarrollada.

6.4.1. Obtención de isotermas

Para obtener el comportamiento de la adsorción de los productos farmacéuticos sobre carbón activo se recurrió a un Jar-Test, en el cual se mantuvo constante la concentración de carbón activo en 1 g/L ante distintas concentraciones de fármaco (0.5, 1, 1.5, 2, 2.5 y 3 mg/L). El ensayo Jar-Test se mantuvo en agitación a 200 rpm durante 120 minutos. Al finalizar el tiempo de ensayo, el sobrenadante se recoge mediante una jeringa de 10 mL y se filtra con un filtro de jeringa de 0,45 micras (para eliminar cualquier resto de carbón que pueda contener). El Jar-Test se realizó a 25°C y a pH neutro.

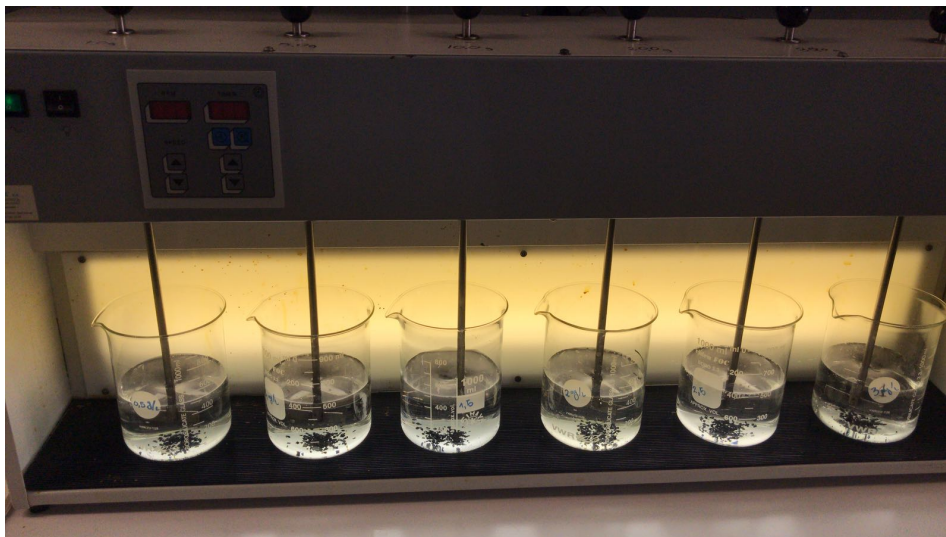


Figura 6.5.: Experiencias con el equipo de jar-test ante distintas concentraciones de fármaco.

Además, también se tomó muestra inicial de medicamento para que sirva como referencia en el cálculo del rendimiento de eliminación de cada fármaco. La experiencia en el Jar-Test se hizo para cada producto farmacéutico puro.

Para calcular el porcentaje de retención se hace uso de la ecuación 8:

$$\% \text{ Retención} = \frac{C_0 - C_f}{C_0} \cdot 100 \quad \text{Ec. 8}$$

6.4.2. Ensayos en planta piloto

Los ensayos en planta piloto se desarrollaron manteniendo constantes los siguientes parámetros de operación: temperatura ambiente a 25 °C, pH neutro de 7 y presión atmosférica. Las condiciones variables fueron: altura del lecho de adsorción y caudal.

Altura del lecho de adsorción

Para calcular la altura óptima del lecho de adsorción se efectuaron distintos ensayos de 150 minutos, en los cuales se rellenó la columna a tres alturas diferentes: 5 cm, 10 cm y 20 cm. A partir de una concentración de entrada (C_E) conocida del fármaco cafeína, se iba midiendo en función del tiempo la concentración de salida (C_S) en el espectrofotómetro de UV-visible.

Caudal

Para calcular el caudal óptimo de operación, se efectuaron distintos ensayos a 150 minutos, en los cuales se probaron tres caudales diferentes: 2,80 L/h, 6,50 L/h y 10 L/h. A partir de una C_E conocida del fármaco cafeína, se iba midiendo en función del tiempo la C_S en el espectrofotómetro de UV-visible.

Obtención de parámetros de diseño

Ya conocidos los parámetros de operación óptimos, se procedió a realizar ensayos con todas las condiciones anteriores constantes, únicamente variando el compuesto farmacéutico. Los ensayos se realizan nuevamente para 150 minutos y para tres medicamentos fácilmente detectables en el espectrofotómetro de UV-visible: cafeína, ibuprofeno y diazepam. Cada ensayo con el medicamento se realizó primero con el carbón sin utilización previa Chiemivall y posteriormente con el carbón agotado de planta potabilizadora de agua.

Con las curvas obtenidas se procedió a calcular los siguientes parámetros de diseño para su posterior escalado industrial: altura de la zona de transferencia de materia (H_{ZTM}), eficacia de la columna (f) y la velocidad de transferencia (R).

6.5. Métodos analíticos: medida de TOC, HPLC y espectrofotómetro de UV-visible

Analizador de carbón orgánico total (COT)

Para la medición del COT se utiliza un equipo TOC-L marca SHIMADZU. Primero se prepara el calibrado correspondiente para la medida del carbono inorgánico (IC) y del carbono total (TC) preparando los calibrados con sodio hidrógeno carbonato en proporción con carbonato sódico para IC y potasio hidrogenoftalato para TC. Posteriormente se introducen las muestras obtenidas del Jar-Test en el multi-muestreador del equipo y se realiza la medida. Sin embargo, las medidas no son concluyentes y eran contradictorias. Este método analítico se descarta para medir concentraciones de fármacos después del ensayo con carbón activo ya que el equipo también detecta la presencia de pequeñas cantidades de carbón activo y causa interferencias con la medida del carbono procedente de los fármacos.

Cromatógrafo de líquidos de alta resolución

Para medir las concentraciones de fármaco obtenidas en el Jar-Test, se utiliza un cromatógrafo de líquidos de alta resolución HPLC marca JASCO, modelo PU-2089 plus, además de un detector de ultravioleta modelo MD-2018 plus y un detector por fluorescencia modelo FP-4020. La columna es la C-18 (marca JASCO) y para todos los fármacos se ha hecho la fase móvil con metanol-agua en las proporciones detalladas en la tabla 6.1. Además, la tabla 6.1 muestra la longitud de onda y el tiempo de detección de cada fármaco. En la figura 6.5 se puede observar una fotografía del equipo utilizado.

Tabla 6.1.: Características de los cromatogramas en HPLC para cada compuesto farmacéutico.

Producto farmacéutico	Fase móvil utilizada (Agua-MetOH)	Longitud de onda de detección (nm)	Tiempo de detección (min)
Acetaminofén	70:30	230	1,5
Ibuprofeno	30:70	243	3,0
Cafeína	70:30	273	2,4
Carbamazepina	30:70	285	1,5
Diazepan	30:70	273	2,4



Figura 6.5: Equipo HPLC marca JASCO utilizado en el método analítico.

Espectrofotómetro de Ultravioleta Visible

Para medir las concentraciones de fármaco en función del tiempo en la planta piloto, se utiliza un espectrofotómetro de ultravioleta visible marca HP modelo 8453. Se prepara una recta patrón para cada producto farmacéutico seguido. En la tabla 6.2. se establecen las longitudes de onda de detección de cada compuesto a partir de bibliografía. Al tratarse de un equipo de diodos-array el equipo efectúa un barrido completo de longitud de onda, en el cual se comprueba a que longitud de onda corresponde el pico máximo de absorbancia. En la figura 6.6 se puede observar una fotografía del equipo utilizado.

Tabla 6.2.: Longitud de onda de detección para cada compuesto farmacéutico a partir de bibliografía.

Producto farmacéutico	Longitud de onda de detección (nm)
Cafeína	273 ¹
Ibuprofeno	225 ²
Diazepan	230 ³

1: (Siong Fong, et al., 2015) 2: (Khoshayanda, et al., 2008) 3: (Debabrata Ghosh & Biswanath, 2009)



Figura 6.6.: Equipo espectrofotómetro de UV-visible marca HP modelo 8453.

7. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

En este capítulo se presentan todos los resultados obtenidos con el Jar-Test (cromatogramas, curvas de calibrado, porcentajes de retención e isothermas) y los obtenidos con la planta piloto (cinética de adsorción, punto y tiempo de ruptura y parámetros característicos) que servirán para el posterior escalado a nivel industrial.

7.1. Resultados obtenidos con el Jar-Test

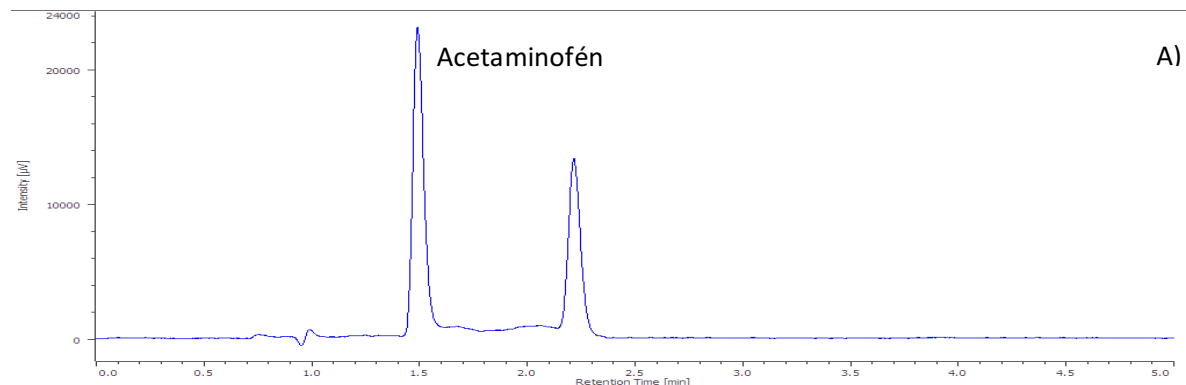
Recta de calibrado para cada fármaco

En la tabla 7.1 se observan los parámetros de las curvas de calibrado realizadas para cada compuesto farmacéutico en el HPLC, con ello se podrán calcular los porcentajes de retención y las isothermas correspondientes. Dichas rectas de calibrado se han realizado desde 0 a 3 ppm, ya que 3 ppm es la concentración máxima de cada fármaco empleada. En la figura 7.1 se pueden observar los cromatogramas obtenidos para cada compuesto para una concentración de 3 ppm.

Tabla 7.1.: Parámetros de las curvas de calibrado y coeficientes de regresión.

Producto farmacéutico	Ecuación de calibrado	Coefficiente de regresión R^2
Acetaminofén	$y = 25.985,01x$	0,99
Ibuprofeno	$y = 12.501,09x$	0,99
Diazepan	$y = 3.544,54x$	0,99
Carbamazepina	$y = 14.296,77x$	0,99
Cafeína	$y = 56.349,00x$	0,99

Cromatogramas



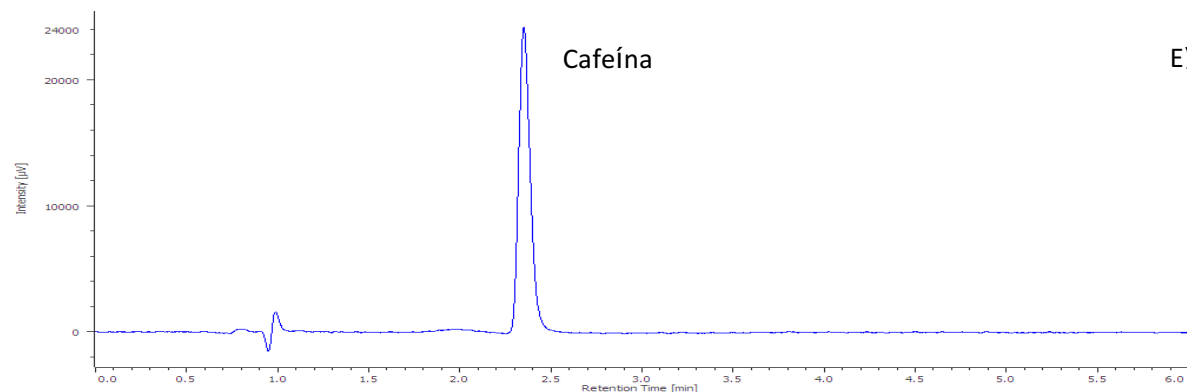
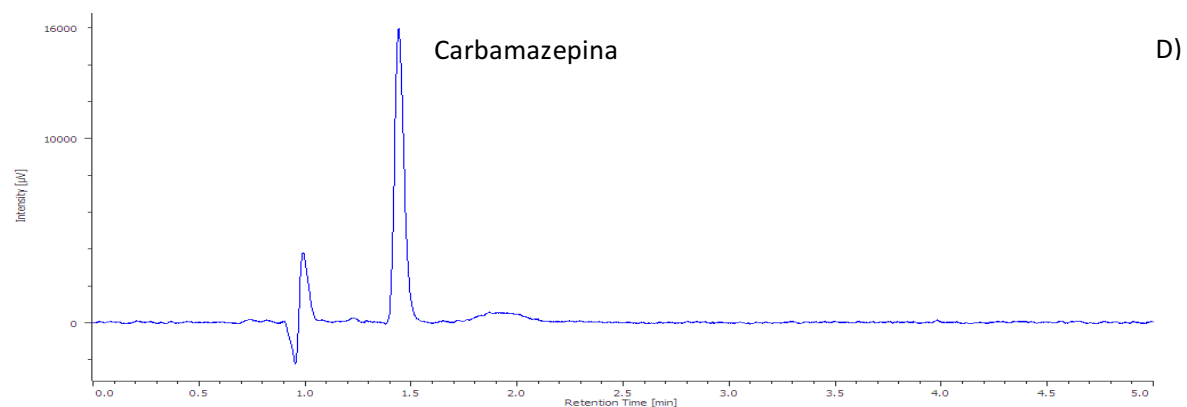
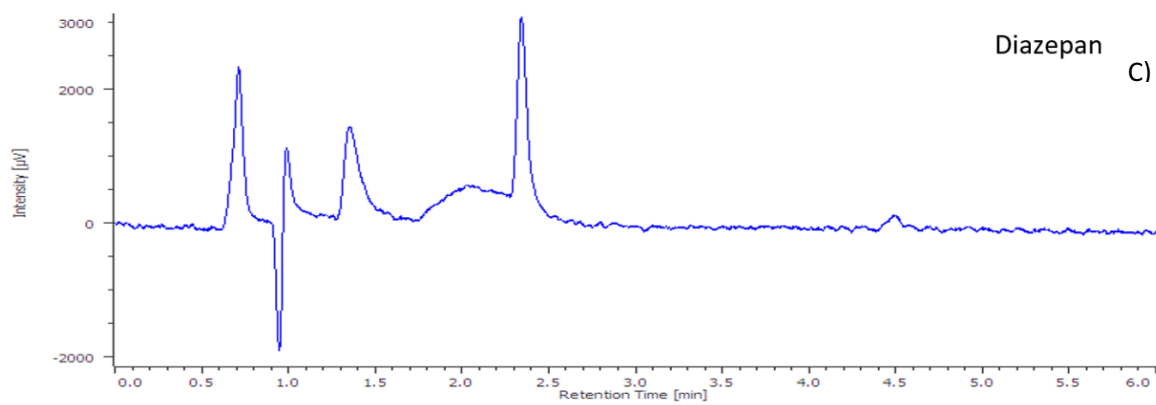
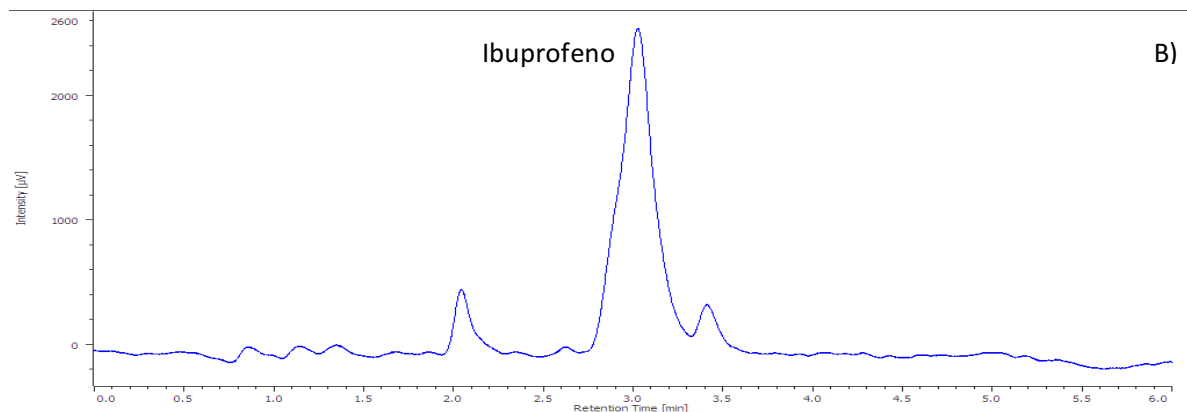


Figura 7.1.: Cromatogramas para cada fármaco A) acetaminofén. B) ibuprofeno. C) diazepam. D) carbamazepina. E) cafeína.

Porcentajes de retención

En la tabla 7.2 se pueden observar los porcentajes de retención para cada compuesto farmacéutico y cada concentración inicial ensayada en el Jar-Test, manteniendo una concentración de carbón activo constante e igual a 1 g/L y el tiempo de ensayo de 120 minutos.

Tabla 7.2.: Porcentajes de retención obtenidos tras el ensayo Jar-Test.

Producto farmacéutico	Concentración inicial teórica (ppm)	Concentración inicial real C_0 (ppm)	Concentración final C_f (ppm)	% Retención*
Acetaminofén	0,5	0,46	0,22	52,92%
	1	0,79	0,42	46,70%
	1,5	1,51	0,60	60,48%
	2	1,91	0,96	49,87%
	2,5	2,55	1,20	52,91%
	3	3,02	1,44	52,38%
Ibuprofeno	0,5	0,39	0,25	35,56%
	1	0,79	0,40	49,24%
	1,5	1,22	0,62	49,00%
	2	2,76	1,03	62,69%
	2,5	2,23	1,09	51,08%
	3	2,68	1,39	48,28%
Diazepan	0,5	0,49	0,10	78,94%
	1	1,08	0,20	81,54%
	1,5	1,35	0,33	75,43%
	2	1,98	0,42	78,96%
	2,5	2,41	0,46	80,99%
	3	3,14	0,65	79,31%
Carbamazepina	0,5	0,84	0,44	47,79%
	1	0,98	0,50	48,44%
	1,5	1,48	0,67	54,32%
	2	2,13	0,61	71,14%
	2,5	2,54	0,83	67,41%
	3	2,90	0,53	81,85%
Cafeína	0,5	0,56	0,20	63,80%
	1	0,97	0,42	56,34%
	1,5	1,51	0,47	69,08%
	2	1,95	0,59	69,73%
	2,5	2,46	0,82	66,72%
	3	2,76	0,85	69,16%

$$*\% \text{ Retención} = \frac{C_0 - C_f}{C_0}$$

De los resultados anteriores se puede observar que el diazepam es el compuesto con mayor grado de retención, el siguiente con mayor grado de retención sería la cafeína. El ibuprofeno es el que menor grado de retención muestra tras los ensayos realizados. Según los experimentos realizados por Snyder, et al., 2007 en planta piloto con carbón activo, los porcentajes de retención medios para los productos farmacéuticos son los observados en la tabla 7.3.

Tabla 7.3.: Comparación entre porcentajes de retención experimentales y de bibliografía.

Producto farmacéutico	% Retención experimental media	% Retención promedio ¹
Ibuprofeno	49,31%	16% - 30%
Acetaminofén	52,54%	70% - 85%
Diazepam	79,19%	65% - 75%
Carbamazepina	61,83%	70% - 90%
Cafeína	65,80%	70% - 74%

1: (Snyder, et al., 2007)

Las condiciones de operación de los ensayos llevados a cabo por Snyder eran las siguientes: 5 mg/L de carbón activo, $C_0 = 0,1$ mg/L y el tiempo de contacto fue de 240 minutos. (Snyder, et al., 2007). Las discrepancias entre los resultados experimentales y los extraídos de la bibliografía se deben a las diferencias entre las condiciones de operación, aunque a pesar de ello son asimilables.

Isotermas de adsorción

A partir de los resultados observables en la tabla 7.2 y de las ecuaciones 2, 3, 4 y 5 de la sección 5.3.1 se calculan los parámetros de las isotermas de Langmuir y Freundlich. Dichos parámetros se evidencian en la tabla 7.4.

La isoterma de Langmuir se grafica partiendo de la ecuación 3 de la sección 5.3.1, en la cual se representa $1/C_f$ en el eje de las abscisas y $\frac{1}{\theta_A} - 1$ en el eje de las ordenadas. En el caso de la carbamazepina, se han despreciado dos puntos por considerarse anómalos. En el caso de la cafeína se ha despreciado un punto. Dichos resultados se muestran en la figura 7.2.

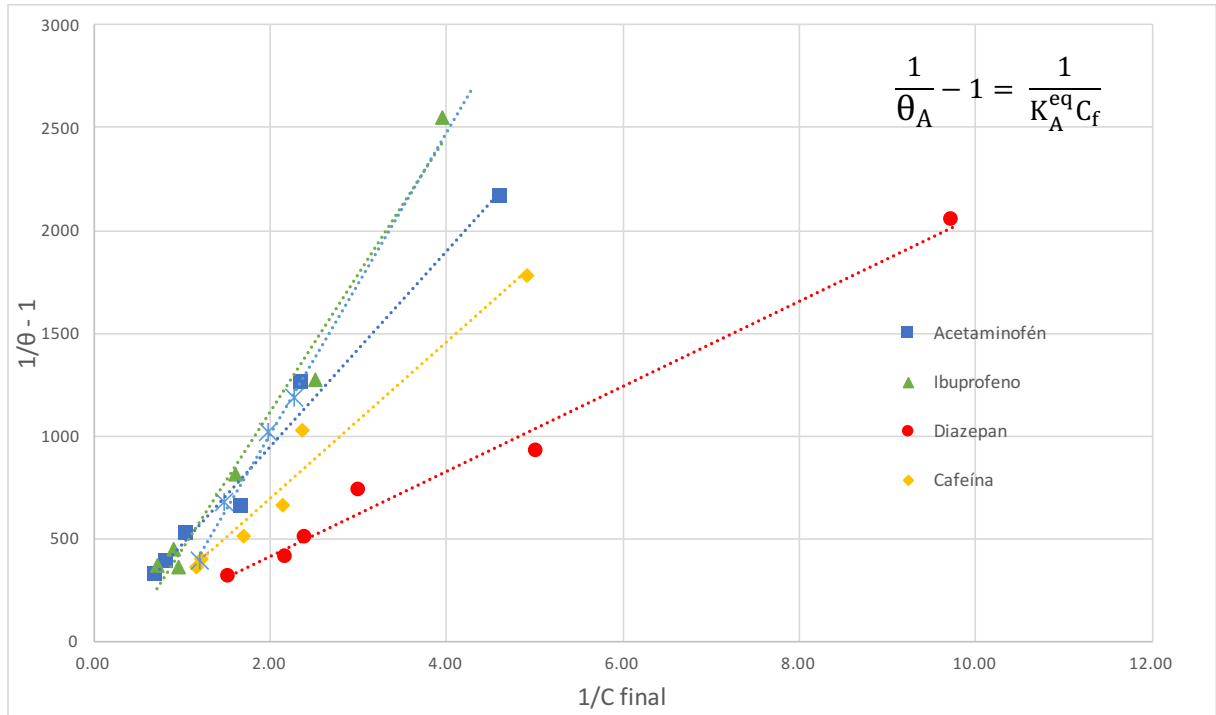


Figura 7.2.: Obtención del parámetro K_A^{eq} de Langmuir para los distintos compuestos farmacéuticos estudiados.

En la figura 7.3. se representan las isotermas de Langmuir para cada compuesto farmacéutico con la constante calculada en la tabla 7.4, en este caso se observa que se está trabajando en el rango lineal de la misma. Se ha calculado para un rango de concentración final mayor al trabajado, para mostrar que se está trabajando en el rango lineal. Esto permite concluir que la pendiente K_A^{eq} interesa lo más alto posible, porque ello significa que, para una concentración de carbón fija y determinada, será capaz de retener más cantidad de fármaco. El diazepam resulta el más óptimo de retener para el CAG probado, mientras que el ibuprofeno tiene la isoterma con pendiente menor. Dichos resultados concuerdan, por tanto, con los porcentajes de retención mostrados en la tabla 7.4 y comentados anteriormente.

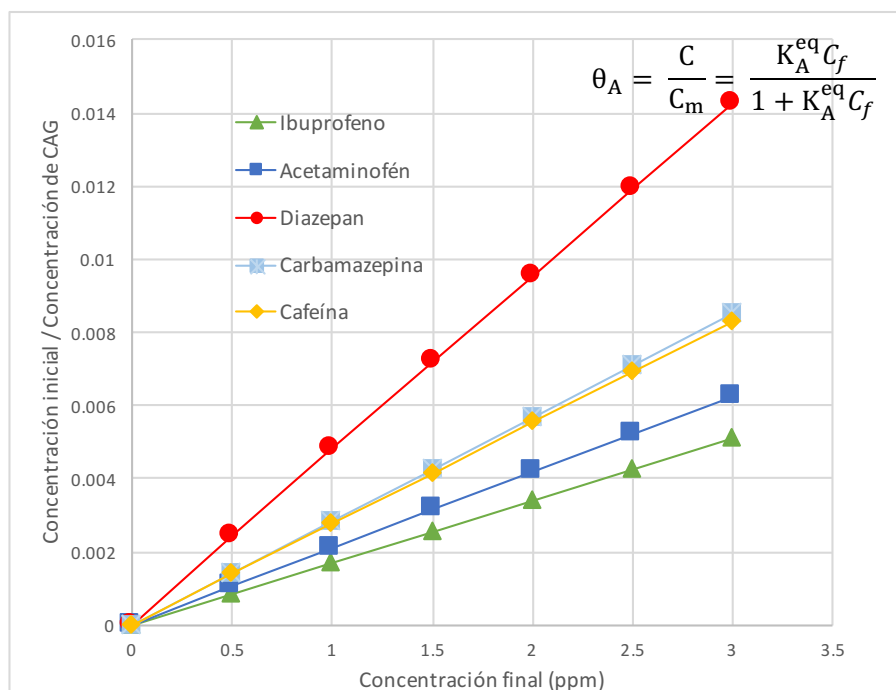


Figura 7.3.: Isotermas de Langmuir para cada compuesto farmacéutico puro a partir de los coeficientes calculados.

La isoterma de Freundlich se grafica partiendo de la ecuación 5, en la cual se representa C_f en el eje de las abscisas y θ_A en el eje de las ordenadas, simulando con los parámetros calculados. Conocida la ecuación de Freundlich, se trata de una ecuación exponencial, sin embargo, en este caso y debido a que el rango de concentraciones es pequeño, esta ecuación se encuentra en el tramo lineal de la misma. En el caso de la carbamazepina, se han despreciado dos puntos por considerarse anómalos. En el caso de la cafeína se ha despreciado un punto. Los resultados se aprecian en la figura 7.4.

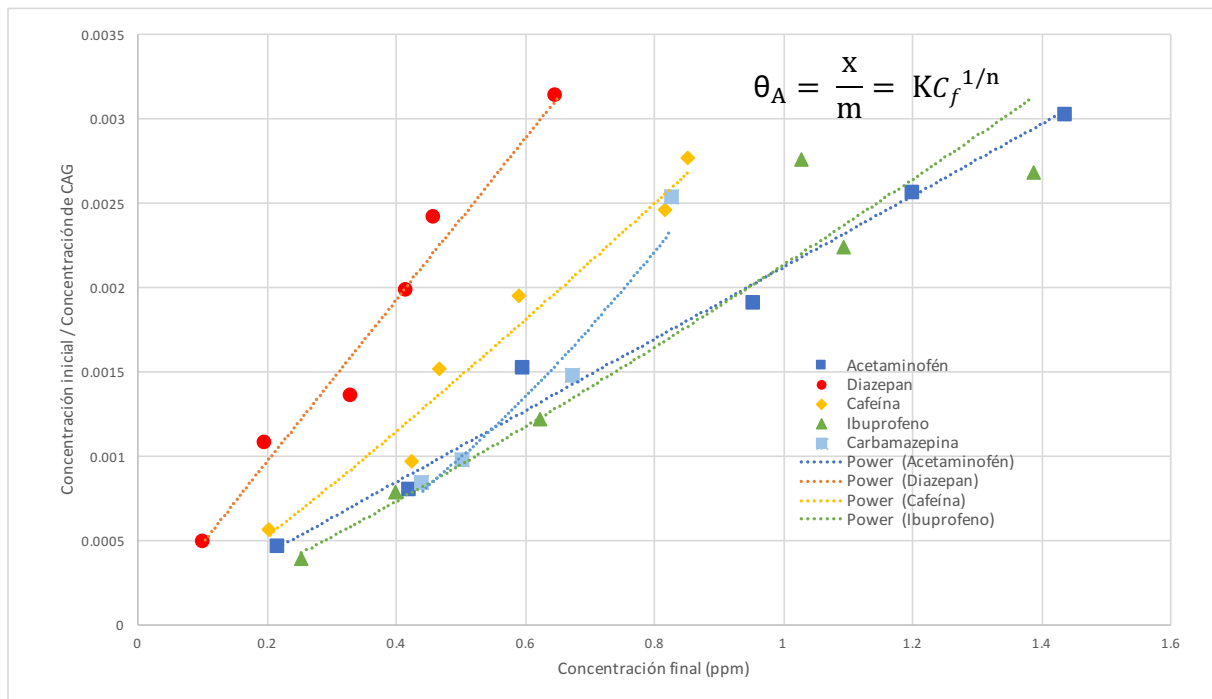


Figure 7.4.: Obtención experimental de los parámetros de Freundlich para los distintos compuestos farmacéuticos estudiados.

En la figura 7.5. se representan las isotermas de Freundlich para cada compuesto farmacéutico con la constante calculada en la tabla 7.4, simulando dichos parámetros. Se trata de una función exponencial, pero en este caso se observa que se está trabajando en el rango lineal de la misma, aunque la carbamazepina muestra un comportamiento anómalo. Esto permite concluir que la constante K interesa lo más alto posible, porque ello significa que, para una concentración de carbón fija y determinada, será capaz de retener más cantidad de fármaco. Con respecto a la constante n , mientras más cercano a 1, el comportamiento de adsorción será más linealmente proporcional y más adecuado, esto se cumple para todos los compuestos excepto la carbamazepina que tiene un $n = 0,586$.

El diazepam resulta el más óptimo de retener para el CAG, mientras que el acetaminofén tiene la isoterma con K menor, es decir, es más difícil de retener empleando este carbón. Se esperaría que la menor pendiente correspondiese al ibuprofeno debido a la isoterma de Langmuir y de acuerdo con la tabla 7.1, sin embargo, sigue siendo solo ligeramente superior al acetaminofén.

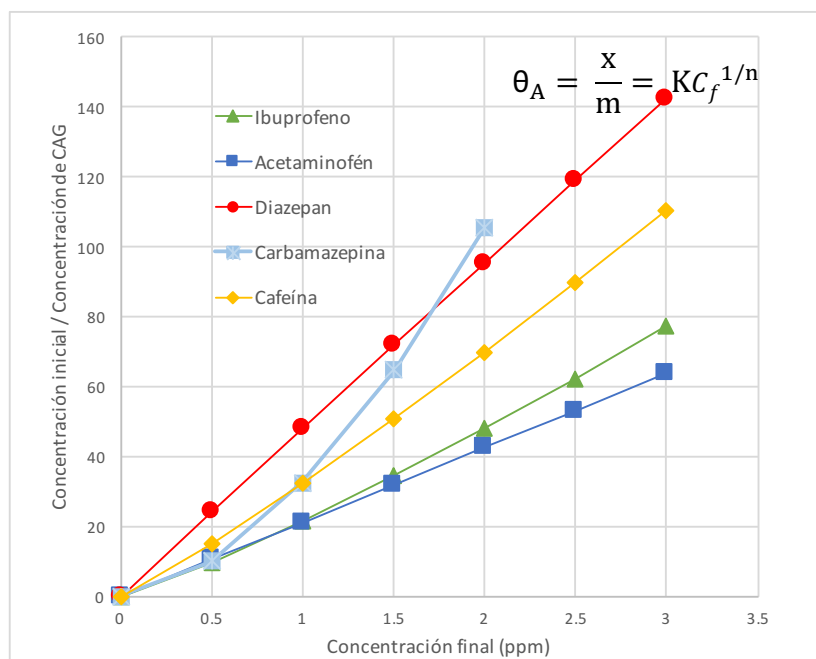


Figura 7.5.: Isotermas de Freundlich para cada compuesto farmacéutico puro a partir de los coeficientes calculados.

De acuerdo con lo comentado anteriormente y observable en la figura 7.5., la carbamazepina muestra un comportamiento no deseado en la isoterma de Freundlich, debido al coeficiente n . Este resultado se puede deber a la escasa solubilidad que presenta la carbamazepina en el agua, lo cual dificultó la preparación de las disoluciones de partida.

Finalmente quedan calculados los parámetros en la tabla 7.4.

Tabla 7.4.: Parámetros calculados de las isotermas de Langmuir y Freundlich para cada fármaco.

Producto farmacéutico	Isoterma de Langmuir		Isoterma de Freundlich		
	$K_A^{eq} \times 10^4$	R^2	$K \times 10^4$	n	R^2
Ibuprofeno	17,18	0,96	21,33	0,86	0,97
Acetaminofén	21,02	0,99	21,18	0,99	0,98
Diazepan	48,23	0,99	47,89	1,01	0,98
Carbamazepina	28,58	0,87	32,37	0,59	0,97
Cafeína	27,87	0,96	32,10	0,89	0,96

Comparando entre ambas isotermas, se observa que ciertamente los parámetros K tienen correlación entre ellos, con lo cual quedan validados los resultados.

Gestión de residuos

En la realización de estos ensayos, las disoluciones de partida remanentes se han reservado en nevera para un posible uso posterior. Las disoluciones después del Jar-Test, luego de haber pasado a través del carbón activo, poseen una concentración muy reducida en producto farmacéutico y por ello fueron desechadas a la red. El carbón activo residual fue depositado en contenedores adecuados para su posterior regeneración.

7.2. Resultados obtenidos con la columna de adsorción

A continuación, se presentan los resultados de los ensayos en la columna diseñada para el CAG comercial y el regenerado de estación potabilizadora.

7.2.2. Resultados relativos al CAG comercial

Primero se definen las curvas de calibrado realizadas para los fármacos en el espectrofotómetro en la tabla 7.5.

Tabla 7.5: Curvas de calibrado realizadas para el espectrofotómetro de UV-visible.

<i>Producto farmacéutico</i>	<i>Ecuación de calibrado</i>	<i>R²</i>
<i>Cafeína</i>	$y = 0,0478x$	<i>0,99</i>
<i>Ibuprofeno</i>	$y = 0,0447x$	<i>0,97</i>
<i>Diazepan</i>	$y = 0,00977x$	<i>0,99</i>

Se han llevado a cabo ensayos en la planta piloto con estos tres fármacos seleccionados a partir de las isotermas del apartado 7.2., en la cual se concluyó que el diazepam presenta la adsorción más favorable, el ibuprofeno la más desfavorable y la cafeína una adsorción intermedia.

Determinación de la altura óptima del lecho de adsorción

A partir de los ensayos descritos anteriormente en el procedimiento experimental, se presentan las tres curvas de la cinética de adsorción de la cafeína para tres alturas ensayadas en la figura 7.5. Dichas cinéticas se estudiaron a un caudal $Q = 2,80 \text{ L/h}$ y para una concentración de entrada $C_E = 1,5 \text{ ppm}$.

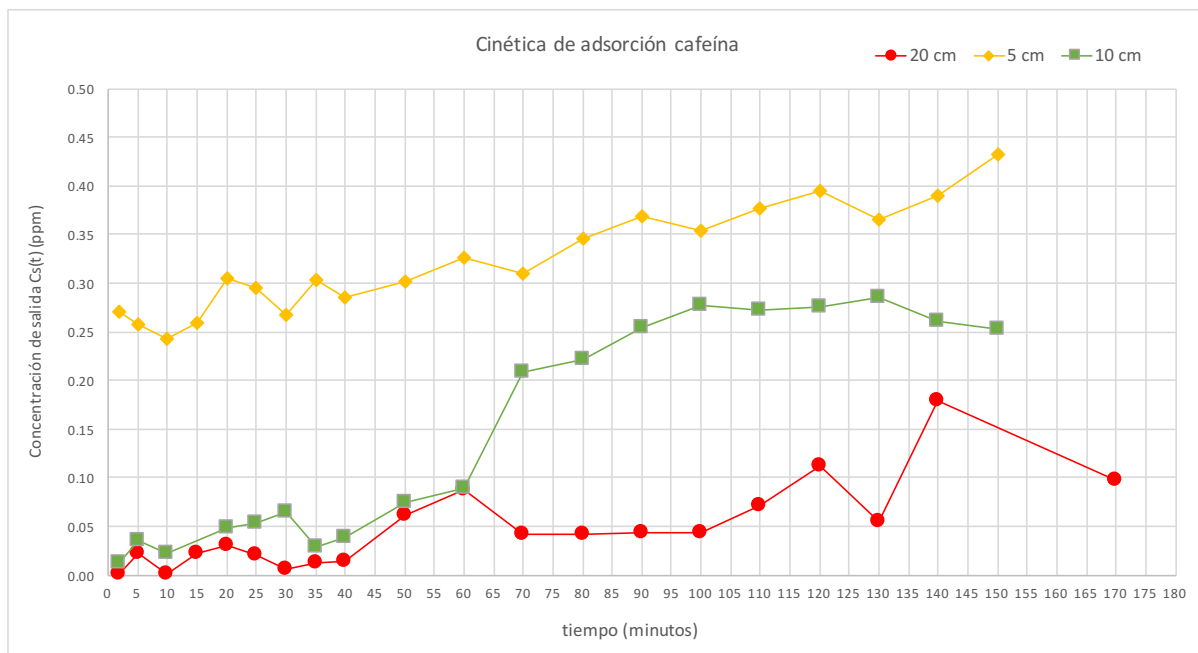


Figura 7.6.: Cinética de adsorción para la cafeína variando la altura del lecho de adsorción.

Analizando la figura 7.6., se determinó que la altura de 5 cm no es la óptima porque desde el primer momento ya hay cafeína a la salida, no pudiendo calcular así una altura de transferencia de materia (H_{ZTM}) porque no existe una zona de transferencia en la columna. De la misma forma, se determinó que la altura de 20 cm tampoco es óptima porque durante toda la realización del ensayo, la concentración a la salida fue nula o casi nula. Esto concluye que el carbón está siendo efectivo, pero a efectos del cálculo de los parámetros para el escalado no resulta procedente.

Con lo expuesto anteriormente, se concluyó que la altura del lecho de adsorción correcta es 10 cm, observando que al principio del ensayo la concentración de salida C_s es prácticamente nula hasta que a los 65 minutos empieza a salir cafeína. La concentración inicial (C_E) no se alcanza a los 150 minutos, es por ello que se realiza nuevamente el ensayo, pero variando el caudal a 6,50 L/h. Sin embargo, a este caudal no hay mejora con respecto al anterior por lo que no se muestran los resultados al no ser concluyentes.

Determinación del punto de ruptura y cálculo de parámetros característicos

En los siguientes ensayos se mantuvieron constantes las siguientes condiciones de operación: caudal de 10 L/h, temperatura ambiente de 25 °C y una altura del lecho de adsorción de 10 cm. En la figura 7.7. se puede observar la cinética de adsorción de la cafeína para una concentración inicial $C_0 = 1$ ppm.

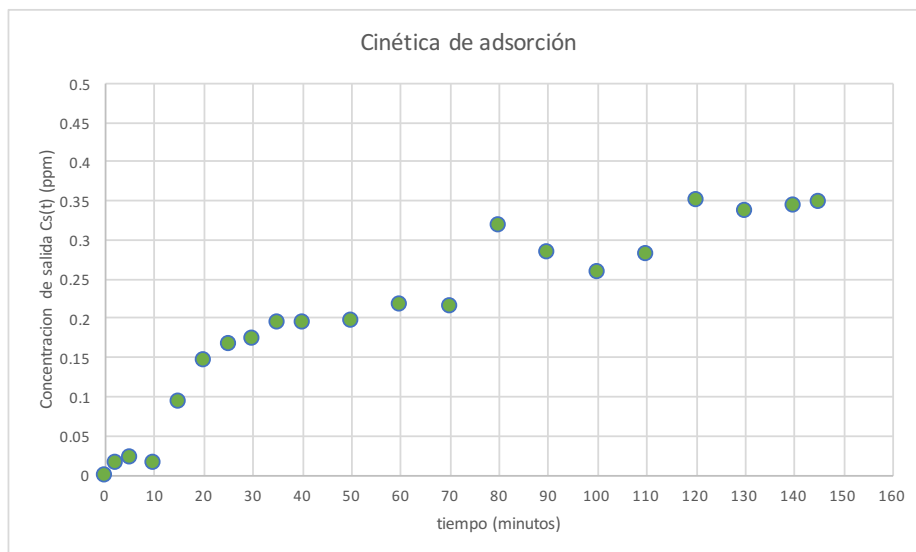


Figura 7.7: Cinética de adsorción de la **cafeína** para $C_0 = 1$ ppm.

Se observa en la figura 7.7. que, durante el ensayo con la cafeína, la concentración de salida al final del ensayo (160 minutos) llega a ser un 40% de la concentración de entrada de 1 ppm. Esto se puede deber a que el carbón requiera un ensayo mucho más largo para saturarse completamente. Además, se observa que la onda de adsorción de este fármaco es de tipo S muy suave y con un punto de ruptura de 10 minutos aproximadamente.

En la figura 7.8. se puede observar la cinética de adsorción del ibuprofeno para una concentración inicial $C_0 = 0,7$ ppm.

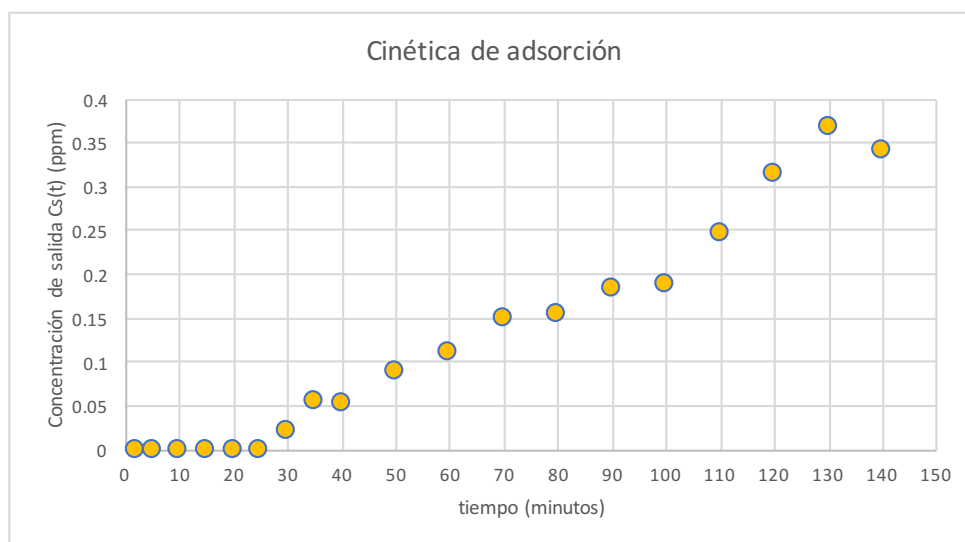


Figura 7.8.: Cinética de adsorción **ibuprofeno** para $C_0 = 0,7$ ppm.

En el caso del ibuprofeno, como se puede observar en la figura 7.8., durante el transcurso del ensayo la concentración de salida llega a ser un 60% de la concentración de entrada. La onda de adsorción de este fármaco es de tipo S menos suave que la cafeína, pero con un punto de ruptura de 20 minutos aproximadamente.

En la figura 7.9. se puede observar la cinética de adsorción del diazepam para una concentración inicial $C_0 = 1,57$ ppm.

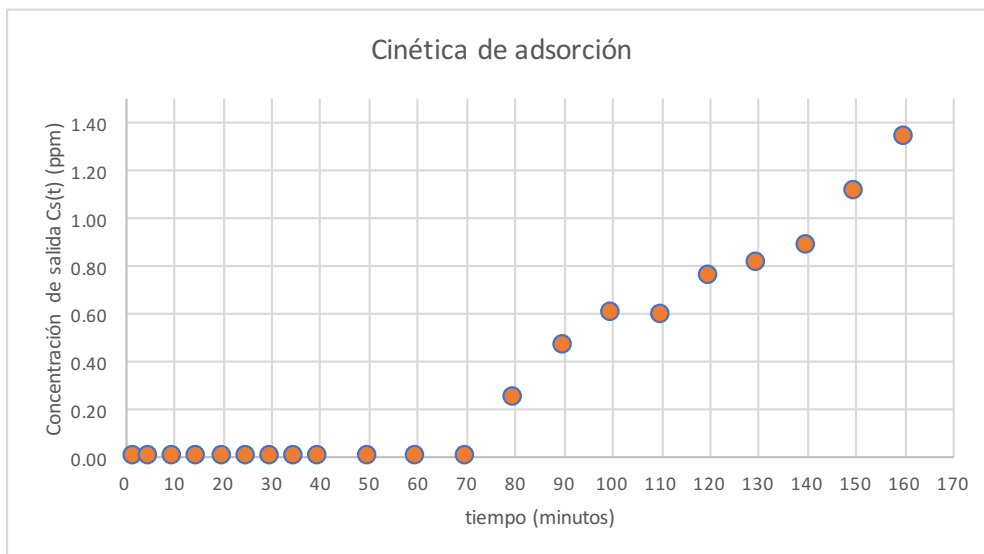


Figura 7.9.: Cinética de adsorción **diazepam** para $C_0 = 1,57$ ppm.

En el caso del diazepam, como se puede observar en la figura 7.9., durante el transcurso del ensayo la concentración de salida llega a ser un 90% de la concentración de entrada. La onda de adsorción de este fármaco es de tipo S menos suave que la de la cafeína y el ibuprofeno, y con un punto de ruptura de 80 minutos aproximadamente. Con todos los datos anteriores y utilizando las ecuaciones 7, 8 y 9 se procede a calcular los parámetros característicos de la planta piloto.

Partiendo de que en ninguno de los tres ensayos se alcanza la concentración inicial, para los cálculos se toma como concentración inicial la concentración final alcanzada en cada ensayo. En la tabla 7.6 se perciben las modificaciones realizadas para los cálculos efectuados.

Tabla 7.6.: Modificaciones a la concentración C_0 para los cálculos efectuados.

<i>Producto farmacéutico</i>	C_0 (ppm)	C_0 modif. (ppm)
<i>Cafeína</i>	1,00	0,35
<i>Ibuprofeno</i>	0,70	0,34
<i>Diazepam</i>	1,57	1,34

Calculando la integral de la ecuación 7 de forma discreta a partir de las figuras 7.7, 7.8 y 7.9 para cada compuesto, se observan los tres parámetros característicos calculados en la tabla 7.7.

Tabla 7.7.: Parámetros característicos de la planta piloto.

Producto farmacéutico	\emptyset	H_{ZTM} (cm)	R (cm/min)
Cafeína	0,30	9,85	0,10
Ibuprofeno	2,36	5,77	0,07
Diazepan	1,74	4,05	0,05

A partir de estos resultados, se concluye que la cafeína tiene una eficacia baja debido a la forma suave de su S , lo cual se traslada también a requerir la mayor altura de carbón para efectuar la operación. El diazepam tiene una eficacia mayor a 1 y además requiere la menor altura de zona de transferencia para el proceso de depuración. Dado que la instalación se va a diseñar para las condiciones más desfavorables, los parámetros de diseño a utilizar serán los correspondientes a la cafeína.

7.2.2. Resultados relativos al CAG regenerado

En esta planta piloto se realizaron ensayos con el carbón regenerado de potabilizadora, concretamente con la cafeína y el diazepam. En la figura 7.10 y 7.11 se pueden observar los resultados de la cinética de adsorción.

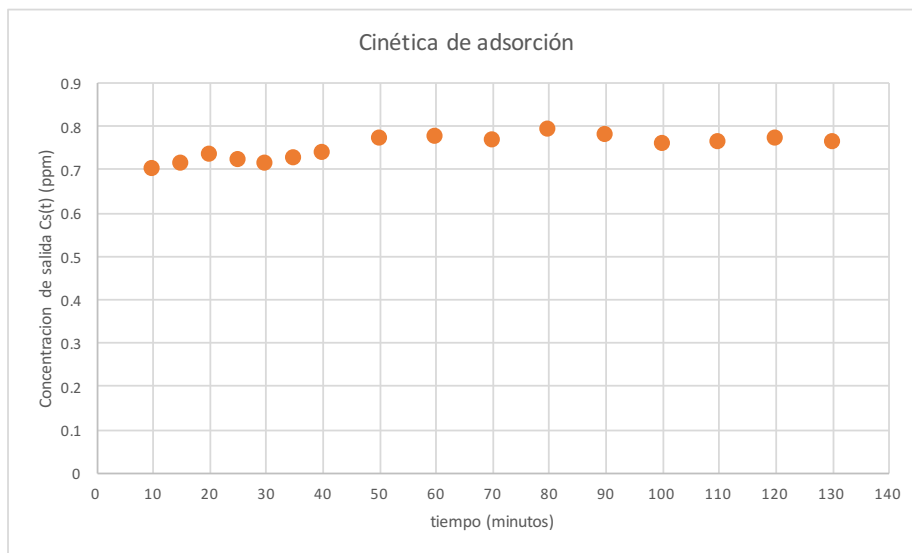


Figura 7.10: Cinética de adsorción **carbón agotado y cafeína** para $C_0 = 1,0$ ppm.

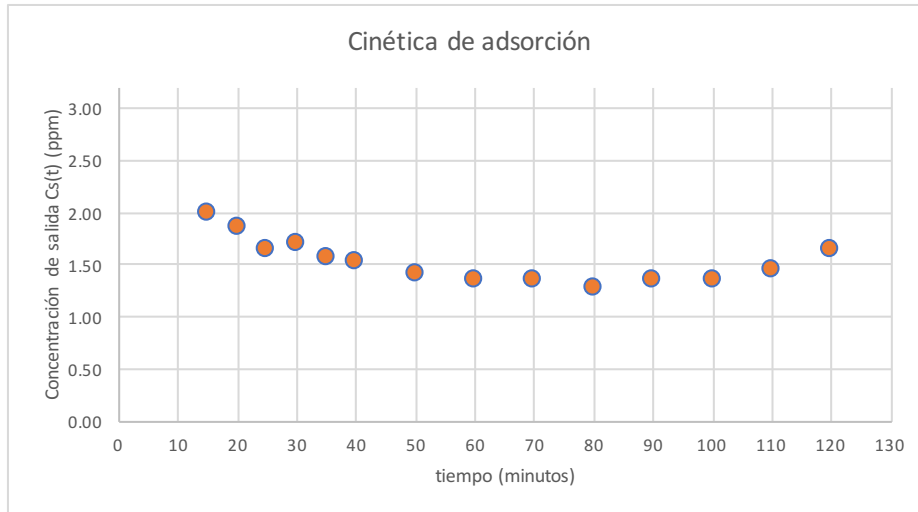


Figura 7.11: Cinética de adsorción **carbón agotado y diazepam** para $C_0 = 1,9$ ppm.

Observando las figuras 7.10 y 7.11, se concluye que el carbón agotado efectivamente sigue adsorbiendo, pero con unos porcentajes de retención muy pequeños. En el caso de la cafeína, desde un principio la concentración de salida es un 70% de la concentración de entrada. En el caso del diazepam, desde un principio la concentración de salida es un 95% de la concentración de entrada. No se forma una onda de adsorción característica y por ello no hay una zona de transferencia de materia. Se estima que la utilización de este carbón para la instalación industrial no sería adecuada y tendría unos costes muy elevados al requerir recambios con alta frecuencia. Se hará el diseño contemplando utilizar carbón activo no agotado.

8. DISEÑO

A partir de los resultados experimentales obtenidos con la planta piloto, se procede a realizar el diseño de la instalación industrial, que se proyecta como parte del tratamiento terciario dentro de una EDAR de 1.000 habitantes equivalentes.

8.1 Cálculos previos

Se debe conocer primero el caudal a tratar partiendo de la población atendida, para ello se realiza el siguiente cálculo:

$$Q_{\text{medio}} = \frac{h_{\text{eq}} * C_{\text{medio-hab}}}{1000} = \frac{1000 h_{\text{eq}} * 220 \frac{L}{h_{\text{eq}} * \text{día}}}{1000} = 220 \text{ m}^3/\text{día}$$

Donde se ha considerado un consumo unitario equivalente de $220 \frac{L}{h_{\text{eq}} * \text{día}}$, que se toma como una media durante las diferentes estaciones del año. Estableciendo un coeficiente punta C_p de 2,4 (según normas MOPU 1986 para poblaciones entre 1.000 y 6.000 habitantes) queda definido el caudal punta a tratar de:

$$Q_{\text{punta}} = Q_{\text{medio}} * C_p = 220 * 2,4 = 528 \text{ m}^3/\text{día} = 0,006111 \text{ m}^3/\text{s}$$

Dadas estas condiciones, se van a diseñar todas las conducciones de PVC y para una velocidad media esperada del agua de $v = 1,5 \text{ m/s}$. La sección de tubería a utilizar es:

$$S_T = \frac{Q_{\text{punta}}}{v} = \frac{0,006111}{1,5} = 0,0041 \text{ m}^2$$

Entonces el diámetro de la tubería de la instalación a utilizar será el siguiente:

$$\varnothing = \sqrt{\frac{4S_T}{\pi}} = 0,0723 \text{ m} = 72,3 \text{ mm}$$

Partiendo de medidas normalizadas, la instalación estará compuesta por tuberías de PVC de DN 80 mm.

8.2 Pretratamiento

La entrada de la instalación serán los efluentes del tratamiento secundario de la depuradora, es por ello que se va a diseñar un tanque de homogeneización/estabilización que prepare el agua para entrar a la siguiente etapa protegiendo a los equipos de posibles fluctuaciones en caudal y características del agua. El tanque se diseña con un volumen para albergar hasta 2 días de caudal punta.

$$V_{\text{tanque-homogen.}} = 528 * 2 = 1056 \text{ m}^3$$

Se instalará un depósito de 1000 m³ de fibra de vidrio adecuado para tratamiento de aguas. Estará además equipado con una válvula para la realización de las purgas. A la salida del depósito se encontrará un sistema de tuberías duplicado e idéntico y contará con un grupo de bombeo compuesto por 2 bombas, cada una con la capacidad de atender la demanda de caudal, pero con dos bombas la instalación adquiere una mayor fiabilidad. A la entrada de cada bomba se contemplará un filtro de protección y una válvula de alivio. Las bombas estarán dimensionadas para trabajar a presión nominal de 2 bar, tratando un caudal de 23 m³/h, de la casa GRUNDFOS, modelo CR 20-2 y vertical con motor de 2,2kW acoplado. El rendimiento de la bomba en estas condiciones se estima en 67%. La curva característica de la bomba se aprecia en la figura 8.1.

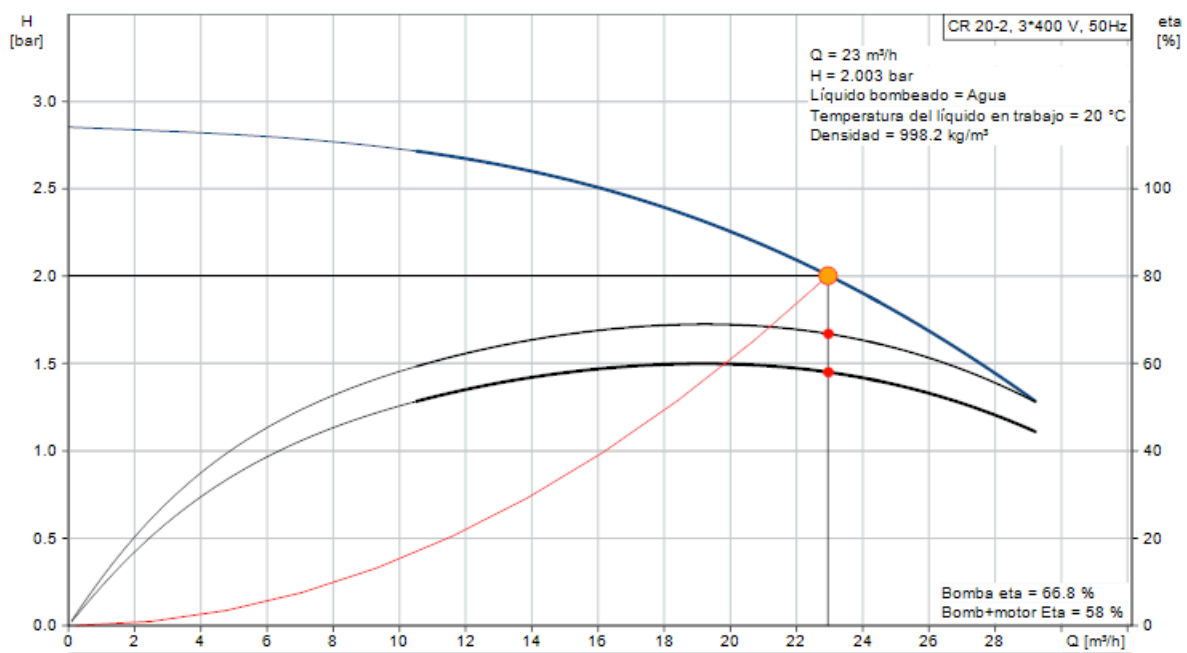


Figura 8.1.: Curva característica de la bomba GRUNDFOS CR 20-2.

Posteriormente se instalará una unidad de filtros de arena, con el objetivo de filtrar cualquier elemento grueso remanente. La unidad de filtros de arena estará compuesta por dos filtros en paralelo, para tener una en funcionamiento mientras otra pueda estar en mantenimiento, optimizando la fiabilidad de la instalación. Cada filtro contemplará una válvula para la realización de purgas. Para calcular la superficie total requerida de filtración:

$$S = \frac{Q}{CH} = \frac{528/24 \frac{m^3}{h}}{8 \frac{m^3}{m^2 h}} = 2,75 m^2$$

Donde *CH* se refiere a la carga hidráulica, que es un parámetro característico que toma valores entre 6 y 9. Cada unidad de filtrado tendrá 3 m² de superficie, que alcanza tratar un caudal máximo de 25 m³/h. Se deberá cargar con 6,5 toneladas de arena de manganeso. El filtro se recomienda de la marca Itank modelo ST-1800.

A la salida de la unidad de filtros de arena, se contempla un grupo de bombeo compuesto por dos bombas, cada una con la capacidad de atender la demanda de caudal, pero con dos bombas la instalación adquiere una mayor fiabilidad. A la entrada de cada bomba se contemplará un filtro de protección. Estas bombas serán idénticas a las representadas en la figura 8.1.

8.3 Unidad de tratamiento con carbón activo (UTC)

La UTC estará compuesta por tres columnas de adsorción independientes y rellenas con CAG en lecho fijo. Dichas columnas estarán configuradas cada una con una válvula de purga. La valvulería y conducciones permitirán configurar la instalación en serie o en paralelo. El funcionamiento diseñado es que existan dos unidades en serie en servicio permanente y una tercera unidad de apoyo y para atender la demanda cuando una unidad esté en mantenimiento.

Existiendo dos unidades en serie, el rendimiento global de la instalación será el consecutivo entre cada una. En caso de ser requerido, las unidades se pueden configurar en paralelo y de esta forma atender un mayor caudal.

El parámetro característico a utilizar para el diseño de las columnas de adsorción será el más desfavorable de los resultados del capítulo anterior, es decir, para la cafeína con un R de 0,10 cm/min. Realizando el cambio de unidades:

$$R = 0,10 \text{ cm/min} = 0,001 \text{ m/min} = 0,06 \text{ m/h}$$

Este parámetro obtenido de forma experimental es inferior al trabajado en los equipos industriales de CAG para filtración rápida, que están comprendidos entre 9 y 24 m/h. Se diseñan las UTC con el parámetro de 0,06 m/h para que los rendimientos obtenidos sean asimilables. Para calcular el área requerida de intercambio:

$$A = \frac{Q}{R * \alpha} = \frac{528/24 \frac{m^3}{h}}{0,06 \frac{m}{h} * 24} = 15,27 m^2$$

Donde α es un coeficiente de 1 a 24 dependiendo del número de horas de trabajo. Resultando el diámetro de los equipos de:

$$\varnothing = \sqrt{\frac{4A}{\pi}} = 4,40 \text{ m}$$

Y siendo la altura típica de los equipos para filtración lenta de 2 a 3 metros, se diseña el equipo con una altura de 2 metros. Quedando el volumen total de 30,5 m³ para la adsorción y con un tiempo de retención de 1,39 h:

$$t_R = \frac{V}{Q} = \frac{30,5 m^3}{528/24 \frac{m^3}{h}} = 1,39 \text{ h}$$

Se asegura que la instalación llegará a rendimientos muy altos en la depuración. Para las UTC se recomiendan los tanques de la marca HENGYUAN, modelo HYH-3600. Para calcular el rendimiento

global de la depuración, se calculan los rendimientos consecutivos de las dos unidades en serie para cada fármaco:

Tabla 8.1.: Porcentaje de retención esperada para dos UTC en serie.

Producto farmacéutico	% Retención experimental media η	% Retención esperada UTC*
Ibuprofeno	49,31%	75,00%
Acetaminofén	52,54%	75,06%
Diazepan	79,19%	83,52%
Carbamazepina	61,83%	76,40%
Cafeína	65,80%	77,50%

La retención en serie se calcula mediante la ecuación 9.

$$* \eta_{UTC} = 1 - \eta(1 - \eta) \quad \text{Ec. 9}$$

8.4 Desinfección y almacenamiento del agua regenerada

A la salida del UTC se encuentra un depósito de agua regenerada, que será idéntico al utilizado para homogeneización (1.000 m³) para permitir un almacenamiento de hasta dos días de caudal pico. Dicho depósito contará con una válvula para la realización de purgas y estará conectado a la red de suministro de agua regenerada. El acondicionamiento a la presión de suministro y conexión a la red de servicio queda fuera del alcance de este proyecto.

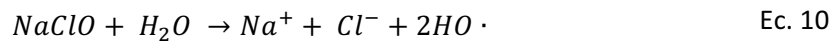
Según el RD 1620/2007 sobre la reutilización de aguas depuradas, el agua deberá contener una calidad moderadamente alta y por ello se debe desinfectar para eliminar cualquier organismo patógeno. Para ello se realiza el diseño de una instalación de cloración para alcanzar las calidades observados en la tabla 8.2. para los usos urbanos y recreativos previstos.

Tabla 8.2.: Calidades exigidas por el RD 1620/2007 sobre las aguas reutilizadas de depuradora.

USO DEL AGUA PREVISTO	VALOR MÁXIMO PERMISIBLE (VMA)			
	Nemátodos intestinales	Escherichia coli	SS	Turbidez
1- USOS URBANOS				
CALIDAD 1.1: RESIDENCIAL a) Riego de jardines privados b) Descarga de aparatos sanitarios	1 huevo/10 L	0 (UFC/100mL)	10 mg/L	2 UTN
CALIDAD 1.2: SERVICIOS a) Riego de zonas verdes urbanas b) Baldeo de calles c) Sistemas contra incendios d) Lavado industrial de vehículos	1 huevo/10 L	200 (UFC/100mL)	20 mg/L	10 UTN

4- USOS RECREATIVOS				
CALIDAD 4.1 a) Riego de campos de golf	1 huevo/10 L	200 (UFC/100mL)	20 mg/L	10 UTN
CALIDAD 4.2 a) Estanques, masas de agua y caudales circulantes ornamentales, en los que está impedido el acceso del público al agua	No se fija límites	10.000 (UFC/100mL)	35 mg/L	No se fija límites

Se calcula una concentración de cloro en el depósito de agua regenerada de 3 mg/L. El cloro se añade en su forma de hipoclorito sódico. La reacción de disolución en agua es la observada en la ecuación 10.



Para mantener la concentración de 3 mg/L de Cl^- , deberán añadirse:

$$\dot{n}_{Cl} \rightarrow \frac{Q}{C_{Cl}} = 528 \frac{m^3}{día} * 3 \frac{g}{m^3} = 1584 \frac{g}{día} \rightarrow \frac{1584 \frac{g}{día}}{35,453 \frac{g}{mol}} = 44,68 \frac{mol}{día}$$

Como se observa en la ecuación 10, la relación molar entre hipoclorito sódico y el ión cloro es 1:1. Se requerirán entonces 44,68 mol/día de hipoclorito sódico. Se admite que la pureza del hipoclorito comercial utilizado será de 12,5% y que la densidad del mismo es 1,1 kg/L.

$$\dot{V}_{NaClO} \rightarrow 44,68 \frac{mol}{día} * 74,44 \frac{g}{mol} = 3,33 \frac{kg}{día} \rightarrow \frac{3,33 \frac{kg}{día}}{12,5\%} = \frac{26,64 \frac{kg}{día}}{1,1 \frac{kg}{L}} = 24,22 \frac{L}{día}$$

Se calcula una autonomía del sistema de hipoclorito de 15 días, es por ello que se diseña un depósito de 0,5 m³, equipado con el cubeto correspondiente de 500 L. La instalación de seguridad de duchas, duchas lavaojos, equipos contra incendios, etc., queda fuera del alcance de este proyecto, pero estará en cumplimiento con el RD 656/2017 del 23 de junio por el cual se regula el Almacenamiento de Productos Químicos (APQ).

La instalación contará con una bomba dosificadora del cloro, se recomienda de la casa GRUNDFOS modelo DDE 6-10, con una presión de trabajo de 2 bar.

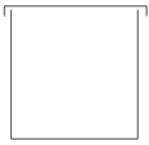
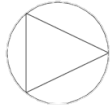


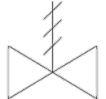

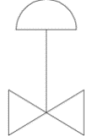
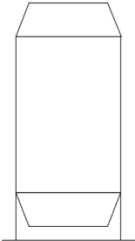
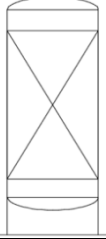

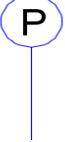
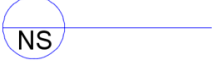
8.5 Circuito de limpieza

Los equipos de filtración de arena y la UTC requieren realizar limpiezas mediante retrolavados de forma frecuente. Es por ello que la instalación contará con un depósito de agua de lavado, que se llenará con agua regenerada a la salida de la UTC. El depósito será de 100 m³, para poder realizar el lavado de una unidad de UTC y una unidad del filtro de arena. Estará equipado con una válvula para purgas y una bomba para el trasiego desde el depósito hacia los equipos. Se recomienda una bomba de la casa GRUNDFOS, modelo CR 20-2, vertical con motor de 2,2kW acoplado, idéntica a la estipulada en la sección 8.2.

8.5 Diagrama de la instalación

A continuación, se va a presentar un diagrama de la instalación, todos los tanques están debidamente conectados a tierra y el tanque de cloro tiene el cubeto correspondiente en cumplimiento del RD 656/2017 de almacenamiento de productos químicos. Todos los efluentes generados por las purgas requeridas por los equipos son conducidos a cabecera de planta. El circuito de limpieza está señalizado en color rojo. En la tabla 8.3. se puede observar la leyenda del diagrama.

Tabla 8.3.: Leyenda del diagrama de la instalación.

	Tanque		Bomba
	Válvula de paso		Filtro
	Válvula de alivio		Válvula de tres vías
	Válvula de purga		Filtro de arena
	Columna de adsorción		Cubeto
	Manómetro		Indicador de nivel: NS para nivel superior y NI para nivel inferior

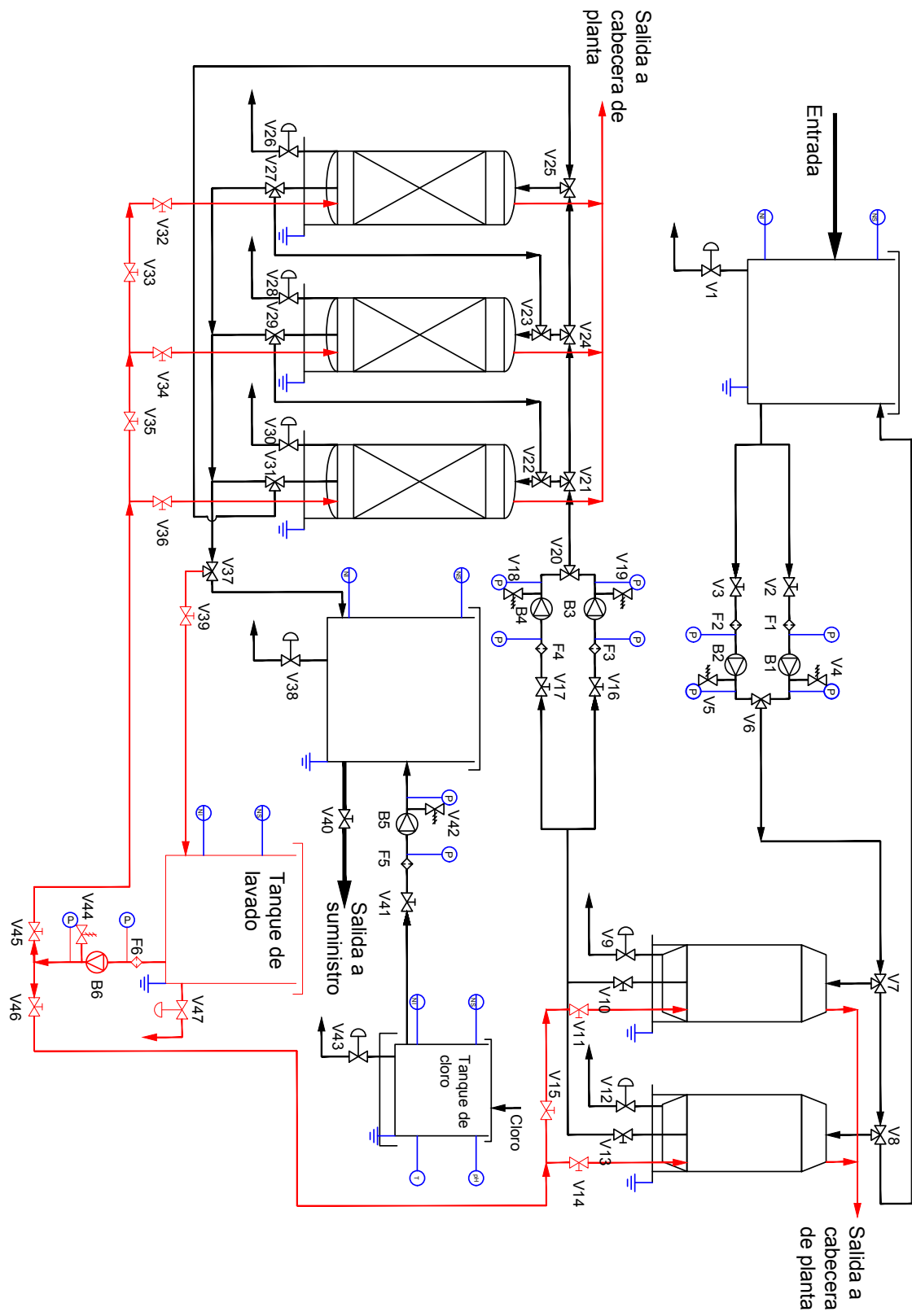


Figura 8.2.: Diagrama de flujo de la instalación.

9. CONCLUSIONES

Tras haber realizado los ensayos analíticos de Jar-Test en el laboratorio, se pudieron obtener los rendimientos de eliminación de cada compuesto farmacéutico, resultando el diazepam el compuesto con mayor porcentaje de eliminación y el ibuprofeno el medicamento con el menor porcentaje de eliminación. Además, se pudieron validar los mismos ya que los parámetros de ambas isotermas son similares y confirman la tendencia obtenida en cuando a los porcentajes de eliminación.

Posteriormente en la planta piloto se pudieron optimizar los parámetros de operación (altura de la zona de transferencia de materia y caudal) que maximizan el rendimiento de eliminación. Se realizaron los ensayos para el ibuprofeno, que tiene el peor rendimiento de adsorción, el diazepam, que tiene el mejor rendimiento de adsorción y la cafeína, que tiene un rendimiento de adsorción intermedio. Al calcular los parámetros característicos de la planta piloto, resultó que la cafeína requería la mayor altura de carbón para una transferencia adecuada y, además, su eficacia era baja, siendo así el caso mas desfavorable. Debido a esto, se realizó el escalado a la instalación industrial para este compuesto (cafeína), adquiriendo columnas de adsorción semejantes. Además, al tener los rendimientos medios obtenidos y las isotermas, se pudieron estimar los rendimientos de eliminación que se obtendrán en la instalación diseñada.

Con la configuración de la UTC en serie diseñada, se puede aproximar que el rendimiento de eliminación de compuestos farmacéuticos estará entre 70-80%, siendo así un tratamiento efectivo para evitar que dichos contaminantes emergentes lleguen a las aguas de dominio público hidráulico y con ello, poder preservar el medio ambiente.

Este trabajo ha cumplido los objetivos propuestos, pudiendo ser una aproximación al mundo del ingeniero químico. Se ha realizado una caracterización analítica, posteriormente se ha diseñado, puesto a punto y probado una planta piloto (a partir de los resultados anteriores) y en último lugar se ha realizado un escalado del prototipo a una instalación industrial. Finalmente, también se ha elaborado un presupuesto y se ha realizado un estudio de viabilidad económica del proyecto para poder valorar su rentabilidad. Así pues, se han empleado todos los conocimientos y competencias adquiridas en la titulación de Ingeniería Química.

10. BIBLIOGRAFÍA

Cabildo Miranda, M. d. P., 2017. *Conceptos básicos y nomenclatura de fármacos*, Madrid: UNED .

Cajigas Delgado, Á., 2012. La evolución de la depuración de las aguas residuales urbanas en España. *Hispagua*.

CIDTA-USAL, 2018. *Características de las aguas residuales*, Salamanca: s.n.

Cortacans Torre, J. A. y otros, 2016. *Presencia de fármacos en aguas residuales y eficacia de los procesos convencionales en su eliminación*, Madrid: Cátedra de Ingeniería Sanitaria y Ambiental.

Dalzell, D., 2002. A comparison of five rapid direct toxicity assessment methods to determine toxicity of pollutants to activated sludge. *Chemosphere*, May, Issue 5, pp. 535-545.

Debabrata Ghosh, D. & Biswanath, S., 2009. A Comparative Study of UV-Spectrophotometry and First-Order Derivative UV-Spectrophotometry Methods for the Estimation of Diazepam in Presence of Tween-20 and Propylene Glycol. *AAPS PhatmSciTech*, Volumen 10, p. 1396.

Doménech, J., 2003. Depuración y potabilización del agua. *Offarm*, 22(8), p. 110.

EFPIA - European Federation of Pharmaceutical Industries and Organizations, 2017. *The Pharmaceutical Industry in Figures*, Brussels: EFPIA.

Fernández, F. & González, A., 2017. *Farmaindustria*. [En línea]

Disponible en: <http://www.farmaindustria.es/web/otra-noticia/la-industria-farmaceutica-espana-datos/>

[Último acceso: 1 Mayo 2018].

Hickmann, S. y otros, 2014. *Fármacos en el medio ambiente - La perspectiva global*. [En línea]

Disponible en:

https://www.umweltbundesamt.de/sites/default/files/medien/378/publikationen/farmacos_en_el_medio_ambiente.pdf

[Último acceso: 1 Mayo 2018].

Instituto Nacional de Estadística, 2017. *España en Cifras*, Madrid: INE.

Jelic et. al., A., 2011. Occurrence, partition and removal of pharmaceuticals in sewage water and sludge during wastewater treatment. *Water Research*, January, 45(3), pp. 1165-1176.

Jorge Luis, R.-M., Gutiérrez-González, E. C. & Colina-Andrade, G. d. J., 2016. Obtención y caracterización de carbón activado obtenido de lodos de plantas de tratamiento de agua residual de una industria avícola. *Ingeniería, Investigación y Tecnología*, Oct-Dic, 17(4), pp. 453-462.

Khoshayanda, M. y otros, 2008. Simultaneous spectrophotometric determination of paracetamol, ibuprofen and caffeine in pharmaceuticals by chemometric methods. *Spectrochimica Acta Part A: Molecular and Biomolecular Spectroscopy*, August, 70(3), pp. 491-499.

Mas Ortega, J. G., 2016. *Análisis coste-beneficio aplicado a los procesos de depuración y reutilización*, Alicante: Universidad de Alicante.

Mendoza Roca, J. A., Montañés Sanjuan, M. T. & Palomares Gimeno, A. E., 2012. *Ciencia y Tecnología del Medio Ambiente*. 2da edición ed. Valencia: Universitat Politècnica de Valencia.

Montes Perales, J., 2016. *Diseño de una instalación para recuperación de antibiótico de una corriente de proceso mediante ultrafiltración*, Valencia: Universidad Politècnica de Valencia.

National Center for Biotechnology Information, s.f. *PubChem Compound Database CID=1983*. [En línea]

Disponible en: <https://pubchem.ncbi.nlm.nih.gov/compound/1983#section=Top>
[Último acceso: 7 Mayo 2018].

National Center for Biotechnology Information, s.f. *PubChem Compound Database CID=156391*. [En línea]

Disponible en: <https://pubchem.ncbi.nlm.nih.gov/compound/156391#section=Top>
[Último acceso: 7 Mayo 2018].

National Center for Biotechnology Information, s.f. *PubChem Compound Database CID=2519*. [En línea]

Disponible en: <https://pubchem.ncbi.nlm.nih.gov/compound/caffeine#section=Top>
[Último acceso: 7 Mayo 2018].

National Center for Biotechnology Information, s.f. *PubChem Compound Database CID=2554*. [En línea]

Disponible en: <https://pubchem.ncbi.nlm.nih.gov/compound/2554#section=Top>
[Último acceso: 7 Mayo 2018].

National Center for Biotechnology Information, s.f. *PubChem Compound Database CID=3016*. [En línea]

Disponible en: <https://pubchem.ncbi.nlm.nih.gov/compound/3016#section=Top>
[Último acceso: 7 Mayo 2018].

National Center for Biotechnology Information, s.f. *PubChem Compound Database CID=3672*. [En línea]

Disponible en: <https://pubchem.ncbi.nlm.nih.gov/compound/3672#section=Top>
[Último acceso: 7 Mayo 2018].

Perry, R. & Green, D., 2001. Adsorbentes e intercambiadores iónicos. En: A. García Brage, ed. *Manual del Ingeniero Químico*. Madrid: McGraw-Hill, pp. 16.8-16.31.

Petrovic, M., Gonzalez, S. & Barceló, D., 2003. Analysis and removal of emerging contaminants in wastewater and drinking water. *TrAC Trends in Analytical Chemistry*, November, 22(10), pp. 685-696.

Petrovic, M. y otros, 2011. Occurrence, partition and removal of pharmaceuticals in sewage water and sludge during wastewater treatment. *Water Research*, 45(3), pp. 1165-1176.

Prados Joyas, G., 2010. *Tratamiento de Aguas para la Eliminación de Antibióticos -Nitroimidazoles- mediante Adsorción sobre Carbón Activado y Tecnologías Avanzadas de Oxidación*, Granada: Editorial de la Universidad de Granada.

Rouquerol, F. y otros, 2013. Introduction. En: *Adsorption by powders and porous solids: principles, methodology and applications*. Oxford: Academic Press, pp. 1-10.

Siong Fong, S., Ahmad Bhawani, S. & Mohamad Ibrahim, M., 2015. Spectrophotometric Analysis of Caffeine. *International Journal of Analytical Chemistry*, Octubre, Volumen 2015, p. 7.

Snyder, S. A. y otros, 2007. Role of membranes and activated carbon in the removal of endocrine disruptors and pharmaceuticals. *Desalination*, Enero, 202(1-3), pp. 156-181.

The Statistics Portal, 2016. *Global Pharmaceutical Industry - Statistics & Facts*. [En línea]
Disponible en: <https://www.statista.com/topics/1764/global-pharmaceutical-industry/>
[Último acceso: 1 Mayo 2018].

Treybal, R. E., 1980. *Operaciones de Transferencia de Masa*. 2da Edición ed. Rhode Island: McGraw-Hill.

Van Boecker et. al., 2014. Global antibiotic consumption 2000 to 2010: an analysis of national pharmaceutical sales data. *The Lancet. Infectious Diseases*, August, 14(8), pp. 742-750.

Villar, A., 2016. *Aproximación A Los Costes De Producción Y Valoración Del Agua Regenerada* , Murcia: Universidad de Alcalá.

Wert, E., Snyder, S., Yoon, Y. & Westerhoff, P., 2005. Fate of Endocrine-Disruptor, Pharmaceutical, and Personal Care Product Chemicals during Simulated Drinking Water Treatment Processes. *Environmental Science Technology*, August, 39(17), pp. 6649-6663.

Wintgens, T., Gallenkemper, M. & Melin, T., 2002. Endocrine disrupter removal from wastewater using membrane bioreactor and nanofiltration technology. *Desalination*, 10 September, 146(1-3), pp. 387-391.

PRESUPUESTO

11. PRESUPUESTO

A continuación, se va a realizar el presupuesto de la instalación industrial, mostrándose los presupuestos parciales de mano de obra, instrumentación, equipos y gastos generales diferenciados en unidades de obra. A todos los efectos, el presupuesto incluye la instalación de los equipos y su puesta en marcha. Este presupuesto no incluye conducciones, maquinaria adicional ni medidas de protección colectivas a falta de medidas a pie de obra. Una vez conocidas las medidas, se realizará una valoración de dicha partida.

11.1. Presupuesto de la mano de obra

En la tabla 11.1 se muestran los costes presupuestados de la mano de obra para la ejecución del proyecto que se estima en 6 semanas, estipulando 40 horas de trabajo por semana.

Tabla 11.1.: Presupuesto de la mano de obra.

Código	Unidad	Descripción	Cantidad	Precio unitario (€/h)	Importe total (€)
1.01	h	Peón ordinario (x2)	480	12,54	6.019,20
1.02	h	Peón especializado	240	12,85	3.084,00
1.03	h	Oficial primera	240	14,10	3.384,00
1.04	h	Ingeniero químico	240	30,00	7.200,00
TOTAL					19.687,20

El presupuesto de la mano de obra asciende a **DIECINUEVE MIL SEISCIENTOS OCHENTA Y SIETE EUROS CON VEINTE CÉNTIMOS (19.687,20 €)**.

11.2. Presupuesto de los depósitos

En la tabla 11.2 se muestran los costes presupuestados de los depósitos requeridos por la instalación.

Tabla 11.2.: Presupuesto de los depósitos.

Código	Unidad	Descripción	Cantidad	Precio unitario (€/Ud.)	Importe total (€)
2.01	Ud.	Depósito 1000 m ³	2	20.000,00	40.000,00
2.02	Ud.	Depósito 100 m ³	1	5.000,00	5.000,00
2.03	Ud.	Depósito 500 L	1	750,00	750,00
2.04	Ud.	Depósito de retención 500L	1	565,00	565,00
TOTAL					46.315,00

El presupuesto de los depósitos asciende a **CUARENTA Y SEIS MIL TRESCIENTOS QUINCE EUROS EXACTOS (46.315,00 €)**.

11.3. Presupuesto de las bombas y válvulas

En la tabla 11.3 se muestran los costes presupuestados de las bombas y las válvulas requeridas por la instalación.

Tabla 11.3.: Presupuesto de las bombas y las válvulas.

Código	Unidad	Descripción	Cantidad	Precio unitario (€/Ud.)	Importe total (€)
3.01	Ud.	Bomba 25 m ³ /h	5	2.845,00	12.425,00
3.02	Ud.	Bomba dosificadora	1	785,00	785,00
3.03	Ud.	Válvula de purga	9	99,50	895,50
3.04	Ud.	Válvula de paso DN80	19	164,82	3.131,58
3.05	Ud.	Válvula de alivio DN80	6	594,68	3.568,08
3.06	Ud.	Válvula de tres vías	13	673,97	8.761,61
3.07	Ud.	Filtro de bomba (25micras)	6	1250,50	7.503,00
TOTAL					37.069,27

El presupuesto de las bombas y válvulas asciende a **TREINTA Y SIETE MIL SESENTA Y NUEVE EUROS CON VEINTISIETE CÉNTIMOS (37.069,27 €)**.

11.4. Presupuesto de la instrumentación y control

En la tabla 11.4 se muestran los costes presupuestados de la instrumentación y control precisados por la instalación.

Tabla 11.4.: Presupuesto de la instrumentación y control.

Código	Unidad	Descripción	Cantidad	Precio unitario (€/Ud.)	Importe total (€)
4.01	Ud.	Manómetro (0-4 bar)	12	103,00	1.236,00
4.02	Ud.	Sonda de temperatura	1	30,96	30,96
4.03	Ud.	Electrodo de pH	1	279,00	279,00
4.04	Ud.	Sensores de nivel	8	164,54	1.316,32
4.05	Ud.	Controlador PID válvulas	41	35,50	1.455,50
4.06	Ud.	Actuador de válvulas	41	303,50	12.443,50
4.07	Ud.	Controlador PID nivel	8	56,60	452,80
4.08	Ud.	Variador de frecuencia bombas 2,2 kW con panel básico de operador (BOP)	6	746,00	4.476,00
TOTAL					21.690,08

El presupuesto de la instrumentación y control asciende a **VEINTIÚN MIL SEISCIENTOS NOVENTA EUROS CON OCHO CÉNTIMOS (21.690,08 €)**.

11.5. Presupuesto de los equipos y materiales

En la tabla 11.5 se muestran los costes presupuestados de los equipos y los materiales requeridos por la instalación

Tabla 11.5.: Presupuesto de los equipos y materiales.

Código	Unidad	Descripción	Cantidad	Precio unitario (€/Ud.)	Importe total (€)
4.01	Ud.	Filtro de arena	2	3.875,00	7.750,00
4.02	Ud.	UTC	3	11.550,00	34.650,00
4.03	ton	Arena de manganeso	13	300,00	3.900,00
4.04	ton	Carbón activo granular 8x30 para tratamiento de aguas	15	985,00	14.775,00
4.05	L	Hipoclorito sódico	500	1	500,00
TOTAL					61.575,00

El presupuesto de los equipos y materiales asciende a **SESENTA Y UN MIL QUINIENTOS SETENTA Y CINCO EUROS EXACTOS (61.575,00 €)**.

11.6. Presupuesto total de ejecución material

En la tabla 11.6 se muestra la suma de los presupuestos parciales para obtener el presupuesto de ejecución material.

Tabla 11.6.: Presupuesto de ejecución material.

Código	Partida	Total (€)
1	Mano de obra	19.687,20
2	Depósitos	46.315,00
3	Bombas y válvulas	37.069,27
4	Instrumentación y control	21.690,08
5	Equipos y materiales	61.575,00
SUBTOTAL		186.336,55
Gastos imprevistos (2%)		3.726,73
TOTAL		190.063,28

El presupuesto total de ejecución material asciende a **CIENTO NOVENTA MIL SESENTA Y TRES EUROS CON VEINTIOCHO CÉNTIMOS (190.063,28€)**.

11.7. Presupuesto total de ejecución por contrata

En la tabla 11.7 se muestra el presupuesto total de ejecución por contrata

Tabla 11.7.: Presupuesto de ejecución por contrata.

Presupuesto total de ejecución material	190.063,28 €
Gastos generales (12%)	22.807,59 €
Beneficio industrial (6%)	11.403,80 €
TOTAL EJECUCIÓN POR CONTRATA	224.274,67 €

El presupuesto total de ejecución por contrata asciende a **DOSCIENTOS VEINTICUATRO MIL DOSCIENTOS SETENTA Y CUATRO EUROS CON SESENTA Y SIETE CÉNTIMOS (224.274,67 €)**.

11.8. Presupuesto base de licitación

En la tabla 11.8 se muestra el presupuesto base de licitación

Tabla 11.8.: Presupuesto base de licitación.

Presupuesto total de ejecución por contrata	224.274,67 €
IVA (21%)	47.097,68 €
PRESUPUESTO BASE DE LICITACIÓN	271.372,35 €

El presupuesto base de licitación asciende a **DOSCIENTOS SETENTA Y UN MIL TRESCIENTOS SETENTA Y DOS EUROS CON TREINTA Y CINCO CÉNTIMOS (271.372,35 €)**.

12. ESTUDIO DE VIABILIDAD ECONÓMICA

Se ha realizado un estudio de viabilidad económica de la inversión a realizar partiendo de las hipótesis económicas de la tabla 12.1. Se estiman 25 años de vida útil a la instalación (posteriormente la planta será desmantelada) y se estipula una pérdida de producción de agua anual del 0,50 %. El precio de venta del agua regenerada se estima en 1,05 €/m³, estando el promedio situado entre 0,50 €/m³ (usos de regadío) y 1,30€/m³ (usos para campos de Golf) (Villar, 2016).

El coste de explotación se estima en 0,68 €/m³, que es la suma del tratamiento primario 0,27 €/m³, el tratamiento secundario 0,06 €/m³, el tratamiento terciario 0,25 €/m³ y 0,10 €/m³ de la distribución (Mas Ortega, 2016).

La tasa de descuento y el IPC utilizados son los convencionales según parámetros macroeconómicos. El incremento de la tarifa al año se estima en 3%, de acuerdo con la última estadística disponible del INE (Instituto Nacional de Estadística, 2017).

Tabla 12.1.: Hipótesis económicas para la simulación.

Hipótesis Económicas	
<i>Inversión con fondos propios</i>	271.372 €
<i>O&M, seguro, etc.</i>	0,68 €/m ³
<i>IPC</i>	1,0%
<i>Tasa de descuento</i>	3,0%
<i>Tarifa de venta</i>	1,05 €/m ³
<i>Perdida de rendimiento anual</i>	0,5%
Incremento de tarifa	
<i>AÑO</i>	<i>% incremento</i>
<i>1 al 5</i>	3%
<i>6 al 15</i>	3%
<i>>15 AÑOS</i>	3%

A continuación, se exponen en la tabla 12.2 los resultados de la simulación de flujos de caja, teniendo en cuenta un impuesto de sociedades del 25% sobre el BAI. En la figura 12.1 se observan los flujos de caja acumulados, donde se puede apreciar el pay-back a los 9,11 años.

Tabla 12.2.: Simulación de los flujos de caja de la instalación.

AÑO	Producción agua	Precio agua	Ingresos por ventas	Costes de explotación	BAI	Impuesto de sociedades	Resultado del ejercicio	CASH-FLOW	CASH-FLOW ACUMULADO
0								-271.372 €	-271.372 €
1	80300 m3	1,050 €/m3	84.315 €	54.604 €	29.711 €	7.428 €	22.283 €	22.283 €	-249.089 €
2	79899 m3	1,082 €/m3	86.410 €	55.150 €	31.260 €	7.815 €	23.445 €	23.445 €	-225.644 €
3	79499 m3	1,114 €/m3	88.558 €	55.702 €	32.856 €	8.214 €	24.642 €	24.642 €	-201.002 €
4	79102 m3	1,147 €/m3	90.758 €	56.259 €	34.500 €	8.625 €	25.875 €	25.875 €	-175.127 €
5	78706 m3	1,182 €/m3	93.014 €	56.821 €	36.192 €	9.048 €	27.144 €	27.144 €	-147.983 €
6	78312 m3	1,217 €/m3	95.325 €	57.389 €	37.936 €	9.484 €	28.452 €	28.452 €	-119.531 €
7	77921 m3	1,254 €/m3	97.694 €	57.963 €	39.730 €	9.933 €	29.798 €	29.798 €	-89.733 €
8	77531 m3	1,291 €/m3	100.121 €	58.543 €	41.579 €	10.395 €	31.184 €	31.184 €	-58.550 €
9	77144 m3	1,330 €/m3	102.609 €	59.128 €	43.481 €	10.870 €	32.611 €	32.611 €	-25.939 €
10	76758 m3	1,370 €/m3	105.159 €	59.720 €	45.440 €	11.360 €	34.080 €	34.080 €	8.141 €
11	76374 m3	1,411 €/m3	107.772 €	60.317 €	47.456 €	11.864 €	35.592 €	35.592 €	43.733 €
12	75992 m3	1,453 €/m3	110.451 €	60.920 €	49.531 €	12.383 €	37.148 €	37.148 €	80.881 €
13	75612 m3	1,497 €/m3	113.195 €	61.529 €	51.666 €	12.917 €	38.750 €	38.750 €	119.630 €
14	75234 m3	1,542 €/m3	116.008 €	62.144 €	53.864 €	13.466 €	40.398 €	40.398 €	160.028 €
15	74858 m3	1,588 €/m3	118.891 €	62.766 €	56.125 €	14.031 €	42.094 €	42.094 €	202.122 €
16	74484 m3	1,636 €/m3	121.845 €	63.394 €	58.452 €	14.613 €	43.839 €	43.839 €	245.961 €
17	74111 m3	1,685 €/m3	124.873 €	64.027 €	60.846 €	15.211 €	45.634 €	45.634 €	291.596 €
18	73741 m3	1,735 €/m3	127.976 €	64.668 €	63.309 €	15.827 €	47.482 €	47.482 €	339.077 €
19	73372 m3	1,788 €/m3	131.157 €	65.314 €	65.842 €	16.461 €	49.382 €	49.382 €	388.459 €
20	73005 m3	1,841 €/m3	134.416 €	65.968 €	68.448 €	17.112 €	51.336 €	51.336 €	439.795 €
21	72640 m3	1,896 €/m3	137.756 €	66.627 €	71.129 €	17.782 €	53.347 €	53.347 €	493.142 €
22	72277 m3	1,953 €/m3	141.179 €	67.294 €	73.886 €	18.471 €	55.414 €	55.414 €	548.556 €
23	71916 m3	2,012 €/m3	144.688 €	67.966 €	76.721 €	19.180 €	57.541 €	57.541 €	606.097 €
24	71556 m3	2,072 €/m3	148.283 €	68.646 €	79.637 €	19.909 €	59.728 €	59.728 €	665.825 €
25	71198 m3	2,134 €/m3	151.968 €	69.333 €	82.635 €	20.659 €	61.977 €	61.977 €	727.801 €

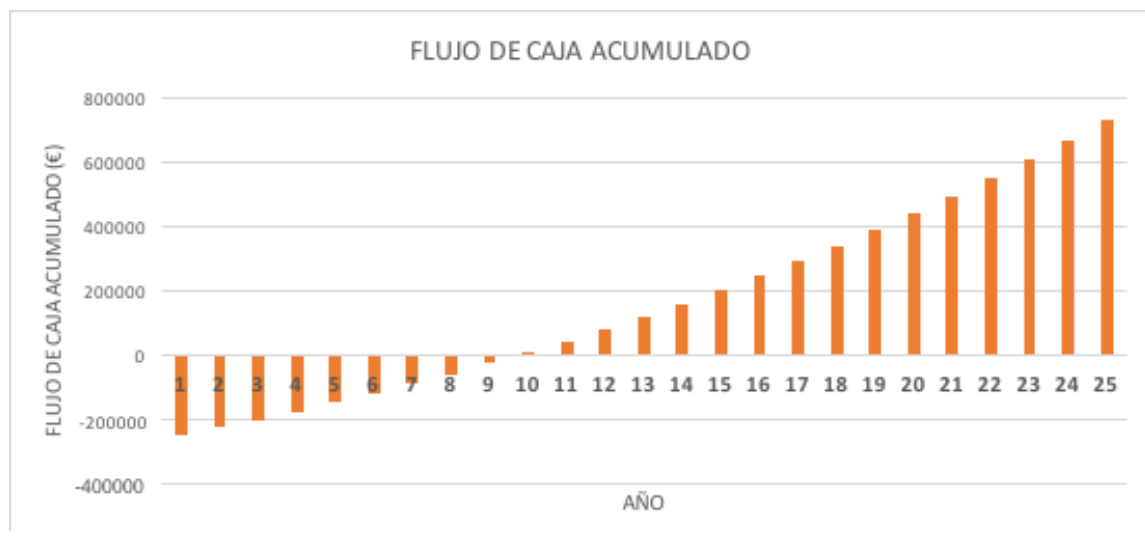


Figura 12.1.: Flujo de caja acumulado de la instalación a 25 años.

Finalmente quedan los resultados económicos de la inversión reflejados en la tabla 12.3., en la cual se puede apreciar la tasa interna de retorno (TIR), el pay-back en años y el valor actual neto (VAN).

Tabla 12.3.: Rentabilidad económica de la instalación durante su vida útil.

RENTABILIDAD PURA DEL PROYECTO (25 AÑOS)	
TIR	10,98%
Pay-back	9,11
VAN	381.360,36 €

Observando estos resultados, se puede concluir que la inversión es rentable, al tener un VAN positivo y elevado. Además, la tasa interna de retorno es de dos cifras, lo cual permite afirmar que la inversión es muy recomendable.

ANEXOS

13. ANEXOS

13.1. Cálculo de disoluciones

Disoluciones de partida de 1 L

Diazepan 5 mg

Peso real: 5,987 mg

Pureza: $5/5,987 = 83,514\%$

Pesado: 20,392 mg

Concentración disolución de partida real: 20,4 mg/L

Ibuprofeno 600 mg

Peso real: 837,12 mg

Pureza: $600/837,12 = 71,674\%$

Pesado: 20,790 mg

Concentración disolución de partida real: 20,8 mg/L

Cafeína pura

Pesado: 10,61 mg

Concentración disolución de partida real: 10,61 mg/L

Carbamazepina

Pesado: 9,67 mg

Concentración disolución de partida real: 9,67 mg/L

Acetaminofén

Pesado: 10,32 mg

Concentración disolución de partida real: 10,32 mg/L

Disoluciones para isoterma

A partir de las disoluciones de partida preparadas en el apartado anterior se preparan 500 mL de disolución de cada concentración y para cada fármaco para el Jar-Test con 1 g/L de concentración de carbón.

Tabla 13.1: Cálculo de disoluciones para isoterma.

<i>Producto farmacéutico</i>	<i>Concentración deseada (ppm)</i>	<i>Expresión</i>	<i>Volumen añadido disolución de partida (mL)</i>	<i>Peso real de carbón (g)</i>
Carbamazepina	0,5	$V = \frac{0,5 * 500}{9,67}$	$V = 26$	0,56
	1	$V = \frac{1 * 500}{9,67}$	$V = 52$	0,50
	1,5	$V = \frac{1,5 * 500}{9,67}$	$V = 78$	0,49
	2	$V = \frac{2 * 500}{9,67}$	$V = 103$	0,50
	2,5	$V = \frac{2,5 * 500}{9,67}$	$V = 129$	0,50
	3	$V = \frac{3 * 500}{9,67}$	$V = 155$	0,49
Acetaminofén	0,5	$V = \frac{0,5 * 500}{10,32}$	$V = 24$	0,51
	1	$V = \frac{1 * 500}{10,32}$	$V = 48$	0,53
	1,5	$V = \frac{1,5 * 500}{10,32}$	$V = 73$	0,50
	2	$V = \frac{2 * 500}{10,32}$	$V = 97$	0,50
	2,5	$V = \frac{2,5 * 500}{10,32}$	$V = 121$	0,52
	3	$V = \frac{3 * 500}{10,32}$	$V = 145$	0,50
Ibuprofeno	0,5	$V = \frac{0,5 * 500}{20,79}$	$V = 12$	0,53
	1	$V = \frac{1 * 500}{20,79}$	$V = 24$	0,50
	1,5	$V = \frac{1,5 * 500}{20,79}$	$V = 36$	0,49
	2	$V = \frac{2 * 500}{20,79}$	$V = 48$	0,52
	2,5	$V = \frac{2,5 * 500}{20,79}$	$V = 60$	0,54
	3	$V = \frac{3 * 500}{20,79}$	$V = 72$	0,50

Tabla 13.1: Cálculo de disoluciones para isoterma.

<i>Producto farmacéutico</i>	<i>Concentración deseada (ppm)</i>	<i>Expresión</i>	<i>Volumen añadido disolución de partida (mL)</i>	<i>Peso real de carbón (g)</i>
<i>Cafeína</i>	0,5	$V = \frac{0,5 * 500}{10,61}$	$V = 24$	0,54
	1	$V = \frac{1 * 500}{10,61}$	$V = 47$	0,50
	1,5	$V = \frac{1,5 * 500}{10,61}$	$V = 71$	0,52
	2	$V = \frac{2 * 500}{10,61}$	$V = 94$	0,50
	2,5	$V = \frac{2,5 * 500}{10,61}$	$V = 118$	0,51
	3	$V = \frac{3 * 500}{10,61}$	$V = 141$	0,49
<i>Diazepan</i>	0,5	$V = \frac{0,5 * 500}{20,40}$	$V = 12$	0,53
	1	$V = \frac{1 * 500}{20,40}$	$V = 25$	0,50
	1,5	$V = \frac{1,5 * 500}{20,40}$	$V = 37$	0,51
	2	$V = \frac{2 * 500}{20,40}$	$V = 49$	0,50
	2,5	$V = \frac{2,5 * 500}{20,40}$	$V = 61$	0,51
	3	$V = \frac{3 * 500}{20,40}$	$V = 74$	0,52

13.2. Ficha técnica carbón activo utilizado



CARBÓN ACTIVADO GRANULAR

El carbón activado **MG 1050** es un carbón granular de alta calidad fabricado mediante un proceso de activación térmica con vapor. Por sus características, el carbón activo MG 1050 puede ser sometido a sucesivos procesos de reactivación con una recuperación excelente de sus índices. Puede además ser utilizado en columnas de lecho fijo o lecho móvil, con un mínimo de pérdidas durante los procesos de contralavado y regeneración.

El **MG 1050** es muy adecuado para el tratamiento de potabilización de agua de pozo o superficial y también en el tratamiento de aguas residuales con predominio de contaminantes de diversos pesos moleculares. Así mismo obtiene excelentes resultados tanto en la decoloración de agua como en los tratamientos terciarios de aguas residuales industriales.

ESPECIFICACIONES	VALOR TÍPICO	UNIDADES	METODO
Número de Yodo (mín.)	1.050	mg/g	ASTM 4607
Granulometría	12x40, 8x30	US Std. Sieve	ASTM 2862
Humedad al ensacar (máx.)	5	%	ASTM 2867
pH	8,0 – 10,0		ASTM 3838
Densidad aparente	480+ 30	Kg/m3	ASTM 2854
CARACTERÍSTICAS TÍPICAS			
Área total (mín.)	1.100	m2/g	Método BET
Densidad aparente después contralavado y lavado	440+30	Kg/m3	
Azul de Metileno (mín.)	210	g/ Kg carbón	Método CEFIC
Diámetro medio partícula	1,0	mm	
Coefficiente Uniformidad	1,7	mm	
Dureza (mín.)	90	%	ASTM 3802

* Disponibilidad de otras granulometrías

Última revisión: Enero 2016

Forma de suministro: camión cisterna, big-bags ó sacos de 25 Kg.
Cumple con la norma EN-12915_1 para su aplicación en agua potable
Cumple con el Reglamento REACH de carbones activados
Número de Registro Sanitario de Industrias: 31.01643/B

Sales del Centro S.L


C/ Bachiller Sanson Carrasco - Parcelas 8 y 10
Apdo- 210 Tarancón 16400 (Cuenca) Tel-969321848 Fax-969320066
Email- info@salesdelcentro.es www.salesdelcentro.es

Figura 13.1: Ficha técnica del carbón utilizado.

13.3. Fichas de seguridad de los reactivos: pictogramas y frases H/P

Tabla 13.2.: Pictogramas y frases H-P de los reactivos.

Producto	Pictograma	Frases H	Frases P
Acetaminofén No. CAS: 103-90-2		H302: Nocivo en caso de ingestión H315: Provoca irritación cutánea H319: Provoca irritación ocular grave H335: Puede irritar las vías respiratorias	P261: Evitar respirar el polvo P305+P351+P338: En caso de contacto con los ojos: aclarar cuidadosamente con agua durante varios minutos, quitando lentillas si lleva.
Ibuprofeno No. CAS: 15687-27-1		H302: Nocivo en caso de ingestión	No presenta
Diazepan No. CAS: 439-14-5		H301+H311: Tóxico en caso de ingestión o en contacto con la piel	P280: Llevar guantes de protección y prendas de protección P301+P310: En caso de ingestión llamar inmediatamente a un centro de información toxicológica P312: Llamar a un centro de información toxicológica o a un médico en caso de malestar
Carbamazepina No. CAS: 298-46-4		H302: Nocivo en caso de ingestión H317: Puede provocar una reacción alérgica en la piel H334: Puede provocar síntomas de alergia o asma o dificultades respiratorias en caso de inhalación	P261: Evitar respirar el polvo, el humo, el gas, la niebla, los vapores, el aerosol P280: Llevar guantes de protección P342+P311: En caso de síntomas respiratorios: llamar a un centro de toxicología o medico
Cafeína No. CAS: 58-08-2		H302: Nocivo en caso de ingestión	No presenta

Producto	Pictograma	Frases H	Frases P
<p>Hipoclorito sódico (12,5%) No. CAS: 7681-52-9</p>		<p>H400: Muy tóxico para organismos acuáticos</p> <p>H290: Puede ser corrosivo para los metales</p> <p>H314: Provoca quemaduras graves en la piel y lesiones oculares graves</p>	<p>P273: Evitar su liberación al medio ambiente</p> <p>P301+P330+P331: En caso de ingestión enjuagarse la boca y no provocar el vomito</p> <p>P303+P361+P353: En caso de contacto con la piel o el cabello quitarse inmediatamente las prendas contaminadas y aclararse la piel con agua o ducharse</p> <p>P304+P340: En caso de inhalación transportar a la víctima al exterior y mantenerla en reposo en una posición confortable para respirar</p> <p>P310: Llamar inmediatamente a un centro de información toxicológica o a un medico</p> <p>P363: Lavar las prendas contaminadas antes de volver a usarlas</p>

