



UNIVERSITAT  
POLITÈCNICA  
DE VALÈNCIA



UNIVERSITAT  
POLITÈCNICA  
DE VALÈNCIA

CAMPUS D'ALCOI

# UNIVERSITAT POLITÈCNICA DE VALÈNCIA

## Escuela Politécnica Superior de Alcoy

Reducción de cromo (VI) a cromo (III) empleando fuentes económicas de hierro como agente reductor

Trabajo Fin de Grado

Grado en Ingeniería Química

AUTOR/A: Dragan , Andreea Silvia

Tutor/a: Santos-Juanes Jordá, Lucas

Cotutor/a: Sciscenko, Iván Matías

CURSO ACADÉMICO: 2021/2022

## Resumen

El cromo hexavalente es un elemento contaminante y tóxico para el medio ambiente y para los seres vivos. Este es común en las aguas residuales de procesos de recubrimientos metálicos. En este trabajo fin de grado se va a estudiar la reducción de cromo (VI) a cromo (III) en disoluciones acuosas empleando como agente reductor hierro metal. Se va a emplear como agente reductor, lana de hierro comercial y viruta procedente de los procesos de mecanizado. Se empleará agua real de empresa con presencia de cromo (VI) en disolución. Se estudiarán las proporciones de hierro metal a emplear por unidad de volumen a tratar, el pH de trabajo y la viabilidad de emplear residuos del sector del mecanizado como agente reductor. Se trata de trabajar la economía circular ya que los recubrimientos metálicos se producen en empresas cercanas a las de mecanizado, si no en la misma. Se estudiará el escalado teniendo en cuenta los volúmenes de efluentes que se generan en la industria y el coste del proceso de depuración para considerarlo como alternativa a la gestión de residuos actual.

**Palabras clave:** reducción, cromo (VI), hierro cero valente, reducción economía circular

## Abstract

Hexavalent chromium is a pollutant and toxic element for the environment and for the living beings. It is common in the metallic coatings wastewater. In this final project, we will study the reduction of chromium (VI) to chromium (III) in aqueous solutions using iron metal as a reducing agent. We will use as a reducing agent commercial Steel wool and iron filings from machining process. We will use real company wastewater with presence of chromium (VI). We will study the proportions of iron metal to be used per volume unit to be treated, pH and a feasibility analysis of using waste from machining sector. It is about studying circular economy since the metallic coatings are produced near to machining companies, if not in the same one. We will study the scale-up taking into account the volumes of effluents generated in the industry and the cost of the purification process to consider it as an alternative to current waste management.

**Keywords:** reduction, chromium (VI), zero valent iron, circular economy  
reduction

## Índice

Resumen .....	1
Abstract .....	2
Índice de figuras .....	6
Índice de tablas .....	7
1. Introducción .....	9
1.1 Cromo .....	10
1.1.1 Características .....	10
1.1.2 Toxicidad .....	12
1.1.3 Usos y aplicaciones .....	14
1.1.4 Tratamiento .....	15
1.2 Hierro cero valente (ZVI) .....	19
2. Objetivos .....	21
3. Procedimiento experimental .....	23
3.1 Experimental .....	23
3.1.1 Reactivos .....	23
3.1.2 Equipos de medida .....	26
3.1.3 Montaje experimental .....	30
3.2 Recta de calibrado de cromo en disolución .....	31
3.3 Experimentos realizados con agua sintética .....	33
3.4 Experimentos realizados con agua de empresa .....	34
4. Resultados .....	36
4.1 Agua sintética .....	36
4.1.1 Tabla resumen .....	36
4.1.2 Experimento realizado sin cambiar pH inicial .....	37
4.1.3 Experimentos variando cantidad de lana .....	37
4.1.4 Experimento con viruta de mecanizado .....	39

4.2	Agua real de empresa .....	40
4.2.1	Tabla resumen .....	41
4.2.2	Experimento agua real con lana-2.5g .....	41
4.2.3	Experimento agua real con lana-5 g .....	42
4.2.4	Experimento agua real con lana-1 g .....	43
4.2.5	Experimentos agua real con viruta-1 g .....	44
5.	Escalado industrial.....	47
5.1	Cálculos .....	47
5.1.1	Tratando el residuo cada día .....	47
5.1.2	Tratando el residuo una vez por semana.....	49
5.1.3	Tratando el residuo una vez al mes .....	49
5.1.4	Tabla resumen escalado.....	50
5.2	Diagrama de flujo .....	50
6.	Estudio económico .....	53
6.1	Estudio económico del tratamiento diario .....	53
6.1.1	Gastos de inversión .....	53
6.1.2	Gastos de explotación .....	55
6.1.3	Costes totales.....	58
6.2	Estudio económico del tratamiento semanal.....	59
6.2.2	Gastos de inversión .....	59
6.2.3	Gastos de explotación .....	60
6.2.4	Costes totales.....	61
6.3	Estudio económico del tratamiento mensual.....	61
6.3.2	Gastos de inversión .....	62
6.3.3	Gastos de explotación .....	62
6.3.4	Costes totales.....	63
6.4	Tabla resumen estudio económico.....	64

7	Conclusiones .....	67
8	Bibliografía.....	69

## Índice de figuras

<b>Figura 1:</b> Distribución del agua de la Tierra .....	9
<b>Figura 2:</b> Óxido de cromo .....	11
<b>Figura 3:</b> Esquema cromado electrolítico .....	14
<b>Figura 4:</b> Resina de intercambio iónico .....	17
<b>Figura 5:</b> Esquema electrocoagulación aguas residuales .....	18
<b>Figura 6:</b> Sal de dicromato de sodio dihidratada .....	23
<b>Figura 7:</b> Agua real de empresa .....	25
<b>Figura 8:</b> Lana de hierro .....	25
<b>Figura 9:</b> Viruta de hierro .....	26
<b>Figura 10:</b> Espectrofotómetro UH5300 .....	27
<b>Figura 11:</b> Bomba peristáltica .....	27
<b>Figura 12:</b> Medidor pH BASIC 20 .....	28
<b>Figura 13:</b> Vasos de precipitado de 100 mL que contienen las muestras a medir en el espectrofotómetro.....	28
<b>Figura 14:</b> Matraz aforado de 1 L .....	29
<b>Figura 15:</b> Micropipeta automática .....	29
<b>Figura 16:</b> Disoluciones de ácido sulfúrico, difenilcarbocida y nitrato en frascos de vidrio.....	30
<b>Figura 17:</b> Tubo Falcon colocado como reactor .....	30
<b>Figura 18:</b> Montaje experimental .....	31
<b>Figura 19:</b> Recta de calibrado.....	33
<b>Figura 20:</b> Reducción cromo (VI) con 2.5 g de lana de hierro a pH 2.....	37
<b>Figura 21:</b> Experimentos variando la cantidad de lana de Fe a pH 1.5 .....	38
<b>Figura 22:</b> Tiempo en reducir hasta los 100 mg/L de Cr (VI) .....	39
<b>Figura 23:</b> Reducción de cromo (VI) mediante viruta de Fe .....	40
<b>Figura 24:</b> Reducción cromo (VI) con 2.5 g de lana de hierro a pH 0.4.....	42
<b>Figura 25:</b> Reducción cromo (VI) con 5 g de lana de hierro a pH 0.4.....	43
<b>Figura 26:</b> Reducción cromo (VI) con 1 g de lana de hierro a pH 0.4.....	44
<b>Figura 27:</b> Agua real de empresa utilizando 1 g de viruta de Fe .....	45
<b>Figura 28:</b> Diagrama de flujo del proceso .....	50
<b>Figura 29:</b> Ahorro de cada tratamiento utilizando lana .....	65
<b>Figura 30:</b> Ahorro de cada tratamiento utilizando viruta .....	65

## Índice de tablas

<b>Tabla 1:</b> Propiedades del cromo .....	12
<b>Tabla 2:</b> Resultados calibrado del cromo hexavalente.....	32
<b>Tabla 3:</b> Tabla resumen condiciones experimentos agua sintética.....	36
<b>Tabla 4:</b> Tabla resumen condiciones experimentos agua real de empresa.....	41
<b>Tabla 5:</b> Tabla resumen resultados escalado (Caso 1).....	50
<b>Tabla 6:</b> Elementos de la planta junto con el precio (Caso 1).....	54
<b>Tabla 7:</b> Salario anual por trabajador por parte de la empresa (Caso 1) .....	56
<b>Tabla 8:</b> Costes material (Caso 1) .....	58
<b>Tabla 9:</b> Costes totales tratamiento diario del residuo (Caso 1).....	59
<b>Tabla 10:</b> Elementos de la planta junto con el precio (Caso 2).....	59
<b>Tabla 11:</b> Salario anual por trabajador por parte de la empresa (Caso 2) .....	60
<b>Tabla 12:</b> Costes material (Caso 2) .....	61
<b>Tabla 13:</b> Costes totales tratamiento diario del residuo (Caso 2).....	61
<b>Tabla 14:</b> Elementos de la planta junto con el precio (Caso 3).....	62
<b>Tabla 15:</b> Salario anual por trabajador por parte de la empresa (Caso 3) .....	63
<b>Tabla 16:</b> Costes material (Caso 3) .....	63
<b>Tabla 17:</b> Costes totales tratamiento diario del residuo (Caso 3).....	64
<b>Tabla 18:</b> Resumen costes totales de todos los escenarios .....	64



# **Introducción**

## 1. Introducción

El agua es un componente natural esencial para la materia viva. Esto es porque alberga y permite el desarrollo de los organismos vivos, ya que es el medio que transporta los nutrientes y los productos de desecho y alberga multitud de ecosistemas, y es un factor decisivo para el crecimiento humano y el desarrollo de la civilización. Se necesita para consumo humano y usos domésticos, usos agrícolas e industriales (Quijada Tomás, 2022).

El agua, como recurso natural, se encuentra disponible como superficial, subterráneo, marino y oceánico (Díaz, y otros, 2009). Aunque se trate de un componente abundante en el planeta, únicamente una pequeña parte, menos del 1%, es aprovechable para el ser humano como agua dulce (Torregrosa, 2021).

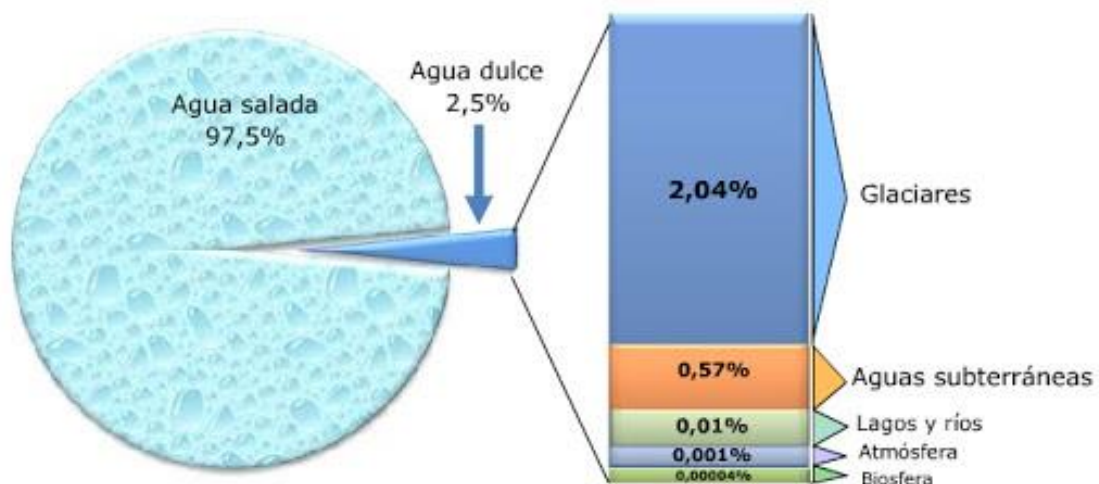


Figura 1: Distribución del agua de la Tierra

El 71% del área del planeta está constituida por océanos, con un volumen de aproximadamente 1340 millones de  $\text{km}^3$  (Shiklomanov & Rodda, 2003). Como podemos observar en la **Figura 1**, la mayor parte del agua del planeta es agua salada, la cual constituye un 97.5% del total, y no es apta ni para consumo humano ni para uso industrial o agrícola. Aunque el resto, 2.5 %, es agua dulce, la mayor parte de esta, 2.04 %, está en forma de glaciares. Los ríos y lagos constituyen un 0.01 % del total. De este, el hombre consume 1/5 parte, en su mayoría para usos agrícolas. Aun así, se prevé que sobre el año 2025, el consumo alcance 3/4 (Quijada Tomás, 2022).

Teniendo en cuenta la escasez de este recurso esencial para los seres vivos, existe otro gran problema que es la contaminación de este. La generación de aguas residuales y su tratamiento es una problemática importante hoy en día. Estos contaminantes pueden ser de carácter orgánico, inorgánico o microbiológico, y estos pueden ser de origen natural o antropogénico. Uno de los residuos industriales que más destaca es el cromo hexavalente, proveniente de procesos de cromados industriales y que destaca por su alta carga contaminante y elevada toxicidad. Sin embargo, esta contaminación también se debe a presencia de compuestos nitrogenados, otros metales pesados como el arsénico o compuestos orgánicos (Durán-Álvarez, Avella, & Zanella, 2015). A continuación, vamos a explicar algunas de sus características, en qué estado se encuentra disponible, sus fuentes de obtención, sus propiedades, así como su toxicidad centrándonos en las consecuencias que tiene sobre la salud humana, diferentes usos y aplicaciones de este elemento en la industria, así como el proceso que se lleva a cabo y, por último, los diferentes tratamientos que se pueden aplicar a las aguas residuales que contienen este metal.

## 1.1 Cromo

Como hemos dicho anteriormente, el cromo es uno de los elementos que se pueden encontrar en las aguas residuales procedente de diferentes procesos industriales. A continuación, vamos a conocer algunas de sus características, las aplicaciones o usos que tiene en la industria, su toxicidad y, por último, el tratamiento actual de las aguas residuales que contienen este elemento.

### 1.1.1 Características

El cromo es un metal de transición duro, frágil y de color plateado metálico (PTR-España, s.f.). A temperatura ambiente lo encontramos en estado sólido, formando parte de minerales como la espinela, cromita o piedra de como de hierro el cual está ampliamente distribuido en la corteza terrestre. A nivel industrial se utilizan concentrados que contienen más del 40% de óxido de cromo ( $\text{Cr}_2\text{O}_3$ ), que posteriormente se trituran para conseguir lo deseado (Gunnar, 2017).



**Figura 2:** Óxido de cromo

Otra de sus principales características es su alta resistencia a la corrosión lo que le confiere una amplia utilidad a nivel industrial. Sus principales estados de oxidación son los de valencia III y VI. Existen otros estados de oxidación como el Cr (II), sin embargo, se trata de un estado inestable que se oxida rápidamente a Cr (III). Los de valencia II son los llamados cromosos y son básicos, los de valencia III o crómicos son anfóteros, mientras que los de valencia VI o cromatos son ácidos (Gunnar, 2017).

Los compuestos formados por Cr (III), como el óxido crómico, son compuestos estables y de gran aplicabilidad comercial. Este se encuentra principalmente unido a la materia orgánica en ambientes acuáticos y en suelos bajo la forma de óxidos, hidróxidos o sulfato (Cervantes, y otros, 2001). Sin embargo, el Cr (VI) es el que más aplicaciones industriales tiene, aunque es altamente tóxico. Esto es gracias a sus propiedades ácidas y oxidativas y su capacidad de formar sales coloreadas e insolubles. Se encuentra combinado al oxígeno formando iones cromato o dicromato (Cervantes, y otros, 2001). Los compuestos más importantes son el dicromato sódico, el dicromato potásico y el trióxido de cromo. Los demás compuestos de cromo son formados a partir de cromato y dicromato sódico. Estos se preparan a partir del mineral natural, el cual se tritura, se seca y se muele. Una vez molido, se le añade sosa u óxido de calcio y se mezcla. Esta mezcla se tuesta en un horno a una temperatura de aproximadamente 1100°C en atmósfera oxidante para conseguir el cromo hexavalente. Una vez acabado este proceso, la muestra se enfría y se lixivia. Por último, se separan el cromato o e dicromato sódico utilizando técnicas convencionales (Gunnar, 2017).

El cromo tiene una densidad de 7.19 g/ml, una masa molar de 51.996 g/mol, una temperatura de fusión de 1875 °C y una temperatura de ebullición de 2665 °C. Sin embargo, no tiene solubilidad en agua, pero sí en ácidos (PTR-España, s.f.).

Las propiedades del cromo se resumen en la tabla siguiente:

Apariencia	Plateado metálico
Densidad (g/ml)	7.19
Masa molar (g/mol)	51.996
Temperatura de fusión (°C)	1875
Temperatura de ebullición (°C)	2665
Solubilidad en agua	Ninguna

Tabla 1: Propiedades del cromo

### 1.1.2 Toxicidad

La toxicidad de este elemento depende de su estado de oxidación y la concentración de este en el residuo. Este ha sido identificado tanto como un macronutriente esencial, como un agente carcinogénico (Katz & Salem, 1994). Por ejemplo, los compuestos de dicromato de sodio y dicromato de potasio son clasificados como carcinógenos (categoría 1 B), Mutágenos (categoría 1 B), y tóxicos para la reproducción (categoría 1 B) (DOUE, 2013). Nosotros nos vamos a centrar en el estudio del cromo (III) y del cromo (VI).

Como hemos dicho anteriormente, el Cr (VI) es de carácter ácido mientras que el Cr (III) es anfótero, por ello, los compuestos que contienen Cr (VI) son mucho más peligrosos que los que contienen Cr (III). Esto es debido a que los primeros tienen una facilidad alta de penetrar en la piel humana a través de cortes y abrasiones combinándose con las proteínas superficiales de esta y formar complejos estables llegando a provocar dermatitis alérgica e incluso ulceraciones. También se ha demostrado que el Cr (VI) es capaz de penetrar en la piel a través de las glándulas sudoríparas y reducirse a Cr (III) en el corion. Las ulceraciones pueden incluso penetrar en el tejido blando y llegar al hueso. También puede ser inhalado provocando irritación en las mucosas, lesiones del tabique nasal, enrojecimiento de la garganta e incluso crisis asmáticas. Una exposición de días a una niebla de ácido crómico en concentraciones de 0.02 a

0.03 mg/l provoca tos, disnea y dolor retroesternal e irritación pulmonar en algunos casos.

Otros problemas de salud que pueden ser provocados por el Cr (VI) son (Lennetech, s.f.):

- Debilitamiento del sistema inmune
- Daño en riñones e hígado
- Alteración del material genético
- Cáncer de pulmón
- Muerte

El Cr (III) puede interferir en el metabolismo del azúcar y causar problemas de corazón (Gunnar, 2017), además de alterar la replicación y transcripción del ADN (Beyersmann & Hartwig, 2008) y llegando incluso a reaccionar con los grupos carboxilos de las enzimas causando alteraciones tanto en la actividad como en la estructura enzimática (Ramirez-Diaz, y otros, 2008). Sin embargo, el Cr (III) también es un componente importante de la dieta tanto humana como animal. Su déficit en la dieta causa una alteración en el metabolismo del azúcar y lípidos.

Hemos hablado sobre los efectos que tiene el cromo sobre el ser humano. Vamos a ver cuáles son los efectos que tiene sobre el medio ambiente y los animales. Recientemente, ha aumentado la preocupación de este elemento por la presencia en el agua, llegando en algunos puntos del planeta a estar en niveles tóxicos como resultado de una descarga incontrolada y tratamientos insuficientes del agua residual que lo contiene (Zayed & Terry, 2003). Una concentración en exceso de Cr (III) en el ambiente podría causar efectos negativos en las plantas. En el sistema marino se ha observado que los peces que nadan cerca de los vertidos con cromo presentan daños en las branquias. Además, también puede causarles problemas respiratorios, defectos de nacimiento, infertilidad y formación de tumores (Lennetech, s.f.).

En resumen, el Cr (VI) es más peligroso que el Cr (III) ya que el Cr (VI) se absorbe fácilmente en el organismo mientras que el Cr (III) no. Este afecta mayoritariamente a los seres humanos.

### 1.1.3 Usos y aplicaciones

La aplicación más importante y conocida del cromo es el cromado ya que se trata de un elemento duro y resistente a la corrosión. Esta técnica consiste en la aplicación mediante electrólisis de una capa de cromo sobre una superficie a la que previamente se le ha aplicado níquelado o cobreado. El cromado se realiza en un baño electrolítico donde se disuelve ácido crómico en agua con una proporción de 300 gramos por litro. A su vez, se le añade 2 gramos por litro de ácido sulfúrico. También puede haber otros catalizadores específicos. El ánodo se compone de plomo o grafito, el cual forma una placa de óxido de plomo que a pesar de ser conductor impide que se siga corroyendo por oxidación anódica. Los cátodos se componen de piezas que van a ser cromadas, colocadas en un bastidor. Como el cromo que se deposita en el cátodo procede de la disolución disuelta., esta se va empobreciendo en cromo a medida que se van cromando las piezas. Es por ello, que cuando esto pase, es decir, cuando el cromo se vaya agotando, hay que reponer añadiendo más ácido crómico a la disolución. (Varios, 1984). La aplicación previa de níquel o cobre a la pieza tiene la finalidad de dar una mayor protección a esta frente a agentes externos. Esta superficie puede ser industrial o piezas decorativas.

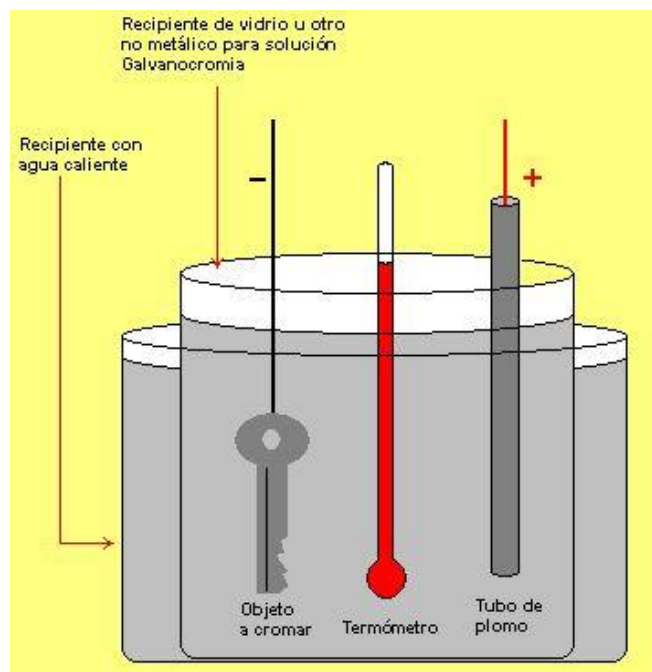


Figura 3: Esquema cromado electrolítico

Existen dos tipos de cromado, el cromado duro y el cromado decorativo. El primero consiste en depositar una capa de cromo de gran grosor la cual protege las piezas que van a estar expuestas a ambientes exteriores y húmedos y les aporta dureza, mayor soporte de impacto, rozamiento o altas temperaturas. El cromado decorativo, por el contrario, consiste en depositar capas de cromo de bajos espesores sobre las superficies de las piezas para mejorar su aspecto. Estas tienen un acabado final blanco azulado y resistente al deslucimiento (Frocán, s.f.). Otro tipo de cromado es el cromado de conversión, un tratamiento superficial que dota al material de resistencia a la corrosión (Insst, 2017).

Otras aplicaciones del cromo son la formación de acero inoxidable junto con el hierro y el níquel. También se puede utilizar en revestimientos, fabricación de cintas magnéticas, curtido de cuero y como catalizador en la síntesis de amoníaco entre otros.

Como podemos ver, las aplicaciones del cromo son muy diversas, pero hay que tener en cuenta que el residuo final es peligroso y necesita un tratamiento posterior. A continuación, vamos a ver cómo se clasifica este residuo según los órganos oficiales y cuáles son los tratamientos actuales llevado a cabo para tratarlo.

#### 1.1.4 Tratamiento

Según el Boletín Oficial del Estado (BOE, 1961), Núm. 292, Sec. I, Pág. 17259, publicado el 7 de diciembre de 1961, las sustancias peligrosas se definen como “las que tengan por objeto fabricar, manipular, expender o almacenar productos susceptibles de originar riesgos graves por explosiones, combustiones, radiaciones u otros de análoga importancia para las personas o los bienes”. El cromo hexavalente se considera una sustancia peligrosa, y las aguas residuales que lo contienen deben de tener un tratamiento posterior debido a su alta toxicidad. El límite de toxicidad de Cr (VI) en el agua es de 1 mg/L y del cromo total de 5 mg/L (BOE, 1961).

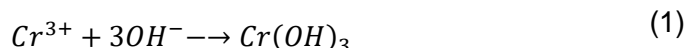
Existen varios métodos para eliminar el contenido de cromo de un agua. Los métodos más empleados implican una reducción del Cr (VI) al Cr (III), ya que este es menos tóxico y menos soluble. Posteriormente se realiza la precipitación y una filtración para concentrar las especies de interés. Algunos métodos, como



los que vamos a explicar, permiten la obtención del cromo y la posibilidad de volver a utilizarlo en la planta industrial (Martínez, 2015). A continuación, vamos a explicar algunos de ellos como son la precipitación, el intercambio iónico, adsorción, mediante biomateriales, la electrocoagulación o mediante membranas entre otros (Chávez Porras, 2010):

- Precipitación

Esta técnica se basa en la adición de productos químicos al agua residual, tales como hidróxidos, carbonatos o sulfuros para la precipitación de los metales pesados. En este método se debe de realizar una reducción previa del Cr (VI) al Cr (III) para así disminuir la solubilidad y la movilidad del cromo. Una vez llevada a cabo la reducción se debe de subir el pH de la disolución hasta un valor de 9-10, ya que el Cr (III) no migra de manera significativa en este rango de pH, sino que precipita rápidamente, ya que el pH proporciona un exceso de iones hidroxilo que reaccionan con los iones de Cr (III) produciendo de esta manera el precipitado de hidróxido de cromo (Arauzo, Rivera, M., Valladolid, Noreña, & Cedenilla, 2003) . La reacción que tiene lugar es la siguiente:



Como la solubilidad del cromo es baja, este se puede recuperar con baños agotados controlando la redisolución del precipitado (Chávez Porras, 2010).

- Intercambio iónico

El intercambio iónico se basa en el intercambio de iones entre dos especies de carga similar, un sólido y un líquido, en el cual no se produce ningún tipo de cambio sustancial en la estructura del sólido. Es un proceso muy selectivo.

Haciendo uso de unas resinas de intercambio iónico constituidas por un polímero orgánico al que se le incluyen grupos ionizables, se consigue concentrar ciertos reactivos en su superficie y recuperarlos a posteriori. En el caso del cromo, se realiza la oxidación del Cr (VI) al Cr (III) que posteriormente se fijará en la columna de intercambio iónico mediante una resina básica intercambiándose con los iones de la superficie de la resina (Chávez Porras, 2010).



**Figura 4:** Resina de intercambio iónico

Como podemos observar en la Figura 4, estas resinas son sólidas, insolubles en agua y en forma de perlas.

- Adsorción

La adsorción es el proceso en el cual átomos, iones o moléculas de una sustancia son retenidas en la superficie de otra. En el tratamiento de aguas residuales que contienen cromo se ha documentado el uso de carbón activado o productos tales como la lignina, ácidos húmicos, feldespato, desechos de fertilizantes o cáscaras de coco (Barkat, Nibou, Chegrouche, & Mellah, 2009).

- Biomateriales

Esta técnica consiste en la adsorción de metales pesados disueltos en una disolución, mediante el uso de un biomaterial que puede ser de origen microbiano o vegetal. *Aspergillus niger*, *Penicillium chrysogenum* o *Rhizopus nigricans*, tienen una capacidad muy alta de adsorción de metales pesados (Sarabjeet S. A., 2007). Otros materiales investigados han sido las cáscaras de nuez, avellana y almendra (Erol & Türkan, 2008). Sin embargo, la desventaja de este método es que es capaz de adsorber cantidades bajas de Cr (VI), menos de 100 mg/L.

- Electrocoagulación

La electrocoagulación es un proceso que elimina contaminantes que se encuentran disueltos, emulsificados o suspendidos en el agua mediante electricidad a través de unas placas metálicas paralelas (Arango Ruiz, 2005).

Esta técnica utiliza electrodos, de hierro o aluminio, para proveer iones al agua residual (Chávez Porras, 2010) provocando reacciones químicas que cambian la forma en la que están presentes los contaminantes dentro del agua formado de esta manera agregados. De esta manera, el coagulante es generado *'in situ'* debido a una reacción de oxidación en el ánodo. La generación de iones metálicos tiene lugar en el ánodo y en el cátodo hay liberación de burbujas de hidrógeno gaseoso las cuales ayudan a la flotación de las partículas floculadas, las mismas que serán retiradas posteriormente (Arango Ruiz, 2005).

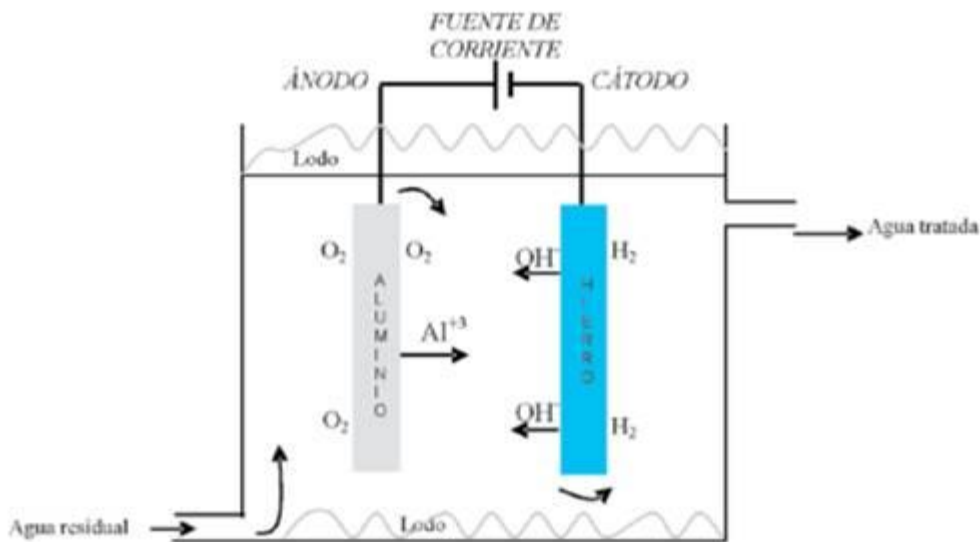


Figura 5: Esquema electrocoagulación aguas residuales

- Membranas

La filtración por membranas consiste en separar los metales del agua haciéndola pasar por una membrana polimérica que solamente permite el paso del agua e impide el paso de los metales mediante ósmosis inversa. Estas membranas suelen ser de acetato de celulosa (Chávez Porras, 2010), aunque también hay membranas de poliéter éter cetona (PEEK) sulfonado (Arthanareeswaran, Thanikaivelan, Jaya, Mohan, & Raajenthiren, 2007).

- Fotocatálisis

Otro de los métodos investigados para la remoción de cromo en aguas residuales ha sido la fotocatálisis heterogénea con dióxido de titanio ( $TiO_2$ ). Este método consiste en irradiar la disolución a tratar durante un período determinado de

tiempo mediante luz ultravioleta en presencia de óxido de titanio. Esta radiación permite promover electrones desde la banda de valencia hacia la banda de conducción generando en esta última un exceso de electrones, generando un estado excitado, que pueden ser transferidos a la sustancia aceptora, en este caso el Cr (VI) provocando de esta manera su reducción a Cr (III). Una ventaja de este método es que, al haber transferencia de electrones entre una banda y otra, al haber deficiencia de electrones en la banda de valencia, esta puede actuar como receptora de electrones de otras sustancias donantes de la disolución. Estas sustancias suelen ser materia orgánica como el formaldehído. De esta manera se consigue también la oxidación de esta materia (Tapia, y otros, 2002).

### 1.2 Hierro cero valente (ZVI)

El hierro de valencia cero (ZVI) es un compuesto metálico que tiene la capacidad de reaccionar, degradar, adsorber o transformar una gran variedad de contaminantes en suelos y aguas (Lima, s.f.). Es un elemento que no presenta toxicidad, es relativamente barato, abundante y fácil de producir. El ZVI es un compuesto fabricado a partir de material residual de hierro mayor al 92%, con un contenido bajo en carbono y otros residuos. El hierro se oxida desde la valencia 0 a estados de oxidación de +2 ó +3, pudiendo ser capaz de producir la reducción de contaminantes mediante una transferencia de electrones.

Es especialmente indicado para el tratamiento de disolventes clorados, metales pesados, cianuros y pesticidas (Lima, s.f.). También se puede utilizar para tratamientos en agua de compuestos explosivos como TNT, DNT, HMX o nitroglicerina, clorofluorocarbonos o compuestos de nitrato.

Este tiene diversas aplicaciones aparte de del tratamiento de aguas, como por ejemplo en barreras reactivas permeables o inyecciones direct push de partículas micrométricas en excavaciones (Envirotecnics, s.f.).

# Objetivos

## 2. Objetivos

El objetivo principal es el estudio de la reducción de Cr (VI) a Cr (III) utilizando reductores económicos como la lana de hierro comercial o la viruta de hierro procedente de procesos de mecanizado.

Otros objetivos específicos que hay que cumplir son:

- Encontrar el pH de trabajo adecuado para que se produzca la reducción
- Estudiar el efecto de la proporción de hierro cero valente que se emplea por unidad de volumen de muestra a tratar
- Probar el tratamiento con agua real de empresa
- Escalar el proceso para el tratamiento de volúmenes similares a los producidos en la realidad
- Calcular el precio del tratamiento

El siguiente trabajo se encuentra alineado con los siguientes objetivos de desarrollo sostenible:

- 6: Garantizar la disponibilidad de agua y su gestión sostenible y el saneamiento para todos
- 12: Garantizar modalidades de consumo y producción sostenibles
- 14: Conservar y utilizar sosteniblemente los océanos, los mares y los recursos marinos
- 15: Gestionar sosteniblemente los bosques, luchar contra la desertificación, detener e invertir la degradación de las tierras, detener la pérdida de biodiversidad

# **Procedimiento experimental**

## 3. Procedimiento experimental

### 3.1 Experimental

A continuación, se detallarán todos los reactivos que se han empleado para llevar a cabo los experimentos, así como su preparación previa, los diferentes equipos empleados en el laboratorio su uso y sus características, la recta de calibrado que se ha llevado a cabo para determinar posteriormente la cantidad de cromo en disolución y, por último, la metodología seguida en el laboratorio para llevar a cabo los experimentos, funcionamiento y condiciones.

#### 3.1.1 Reactivos

##### 3.1.1.1 Agua sintética

Con el objetivo de aproximarnos a un proceso real, se ha preparado en el laboratorio una disolución de dicromato de sodio con un contenido en Cr (VI) de 400 mg/L. Se ha preparado esta concentración, debido a que se acerca, según bibliografías, a la concentración de cromo hexavalente habitual en industrias de cromado (Pájaro & Díaz, 2012).

A nivel industrial, los compuestos de cromo se fabrican mayoritariamente a partir de cromato y dicromato sódico (Gunnar, 2017).

Por tanto, se ha preparado una disolución de 1 litro de dicromato de sodio ( $\text{Na}_2\text{Cr}_2\text{O}_7$ ) que contiene aproximadamente 400 mg/L de cromo (VI), cantidad usual en la industria.



**Figura 6:** Sal de dicromato de sodio dihidratada

Los cálculos realizados fueron los siguientes:



La sal de dicromato de sodio empleada está hidratada con dos moléculas de agua, y su peso molecular total es de 298 g/mol. Sabiendo que el peso molecular del cromo es de 52 g/mol:

$$\frac{52 \cdot 2}{298} = 0.34 \quad (2)$$

Esto quiere decir que el 32% de la sal es cromo.

A partir de esto, se realizan los cálculos para preparar una solución que contenga 400 mg/L de cromo (VI):

$$\frac{400}{0.34} = 1176.47 \text{ mg Na}_2\text{Cr}_2\text{O}_7 \cdot 2\text{H}_2\text{O} \quad (3)$$

Por tanto, se pesan 1.18 g de  $\text{Na}_2\text{Cr}_2\text{O}_7 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$  y se enrasa en un matraz aforado de 1 L con agua desionizada (agua destilada con adición de  $\text{HNO}_3$  concentrado) de  $\text{pH} < 2$ . Este pH es necesario, ya que, como se ha explicado en el apartado de características del cromo, este no es soluble en agua sino en disoluciones ácidas.

#### *3.1.1.2 Agua real de empresa*

Para algunos de los experimentos se utilizó agua real procedente de una empresa fabricante de recubrimientos sobre plástico de alto valor para las industrias de automóviles y camiones comerciales situada en la Foia de Castalla. Esta agua tiene un pH aproximado de 0.4 y una concentración de cromo (VI) de alrededor de 1000 mg/L. Se trata de una concentración alta ya que la empresa realiza un proceso de evaporación para así concentrar la cantidad de Cr (VI) y reducir el volumen de agua residual. En la **Figura 7** podemos observar cómo es el residuo real.



**Figura 7:** Agua real de empresa

Este residuo presenta un color verde oscuro ya que no se trata de una disolución pura de cromo hexavalente, sino que puede presentar abrillantadores y otras sustancias para dar un mejor acabado al material final.

#### *3.1.1.3 Agentes reductores*

Se utilizaron como agentes reductores lana de hierro comercial de 0.1 mm de diámetro de filamento y viruta de hierro procedente de procesos de mecanizado de diferentes tamaños de partícula.



**Figura 8:** Lana de hierro



**Figura 9:** Viruta de hierro

Para aproximar el proceso a una posible aplicación industrial se ha pensado utilizar residuo real de viruta de hierro procedente de industria de mecanizado, ya que estas suelen encontrarse muy cerca de las industrias de recubrimiento metálico, consiguiendo de esta manera abaratar costes de material. Esta tiene propiedades similares a la lana de hierro. Como podemos observar en las dos figuras anteriores, la lana de hierro tiene un mayor volumen que la viruta de hierro. También se puede observar cómo la viruta de hierro tiene un área específica menor que la lana de hierro y un tamaño de partícula más grande, obstaculizando de esta manera el ataque de la disolución sobre esta.

Cabe destacar que no se trata de hierro puro, sino de hierro con un porcentaje muy bajo en carbono (menos del 2%), conocido como acero dulce.

### 3.1.2 Equipos de medida

A continuación, se detallarán los equipos de medida utilizados durante el experimento:

#### 3.1.2.1 Espectrofotómetro

Se trata de un aparato que mide la cantidad de intensidad de luz absorbida por la muestra introducida. Este se va a utilizar para determinar la cantidad de Cr (VI) en la muestra. Para ello, se va a hacer uso de una cubeta de vidrio con una longitud de corte de absorción de 300 nm, es decir, permite el paso de luz hasta 300 nm. La longitud de onda seleccionada será de 540 nm, ya que como se explicará más adelante, el método de determinación del cromo genera un complejo coloreado que tiene un máximo a esta absorción.

En este caso se ha utilizado el modelo UH5300 Hitachi, el cual cuenta con una lámpara de destello de xenón y una capacidad de medición de entre 190 y 1100 nm.



**Figura 10:** Espectrofotómetro UH5300

### *3.1.2.2 Bomba*

Se hizo uso de una bomba dosificadora peristáltica para recircular la muestra por nuestro lecho de hierro cero Valente, de la marca Seko Italia, modelo PR7. Esta cuenta con 10 velocidades. Para la realización de los experimentos esta se ajustó a una velocidad de caudal de 2 mL/s (7.2 L/h).



**Figura 11:** Bomba peristáltica

### *3.1.2.3 pH-metro*

Ajustar el pH antes de la reacción, como veremos más adelante es muy importante. Para medir el pH de las disoluciones se hizo uso de un medidor de pH Basic 20 de la marca Crison. Este consta de una calibración de pH con 3

tampones seleccionables, pudiendo medir tanto en continuo o por estabilidad. Tiene una frecuencia de calibración programable de entre 0 horas y 7 días.

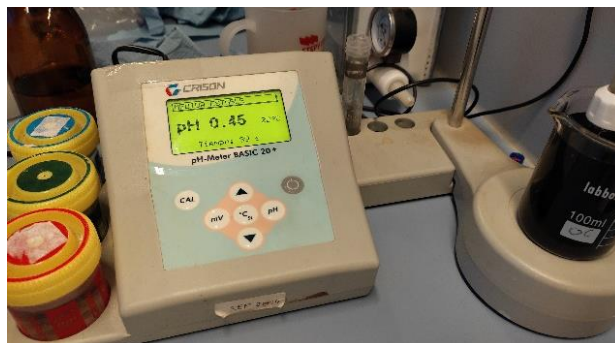


Figura 12: Medidor pH BASIC 20

#### 3.1.1.2.4 Otros materiales

Otros materiales e instrumentos de laboratorio utilizados han sido:

- Vasos de precipitado de 100 mL para contener la disolución y para transferir la muestra para su posterior dilución y tratamiento para la determinación de cromo (VI).

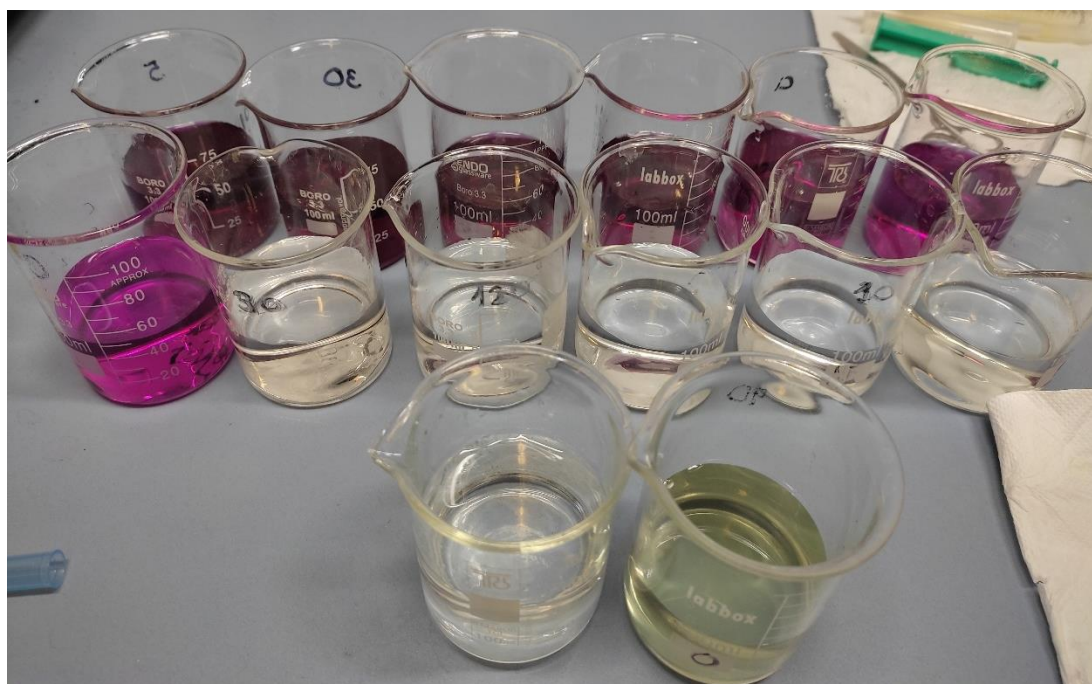


Figura 13: Vasos de precipitado de 100 mL que contienen las muestras a medir en el espectrofotómetro

- Matraz aforado de 1 L para preparar la disolución patrón y de 100 mL para la disolución del experimento.



**Figura 14:** Matraz aforado de 1 L

- Micropipeta automática para tomar los 0.5 mL de muestra para su posterior dilución y medida.



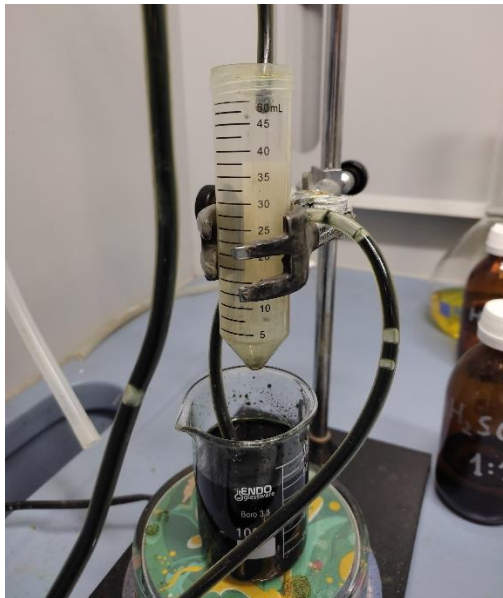
**Figura 15:** Micropipeta automática

- Frasco de vidrio ámbar para guardar las disoluciones de difenilcarbocida, ácido sulfúrico y nitrato.



**Figura 16:** Disoluciones de ácido sulfúrico, difenilcarbocida y nitrato en frascos de vidrio

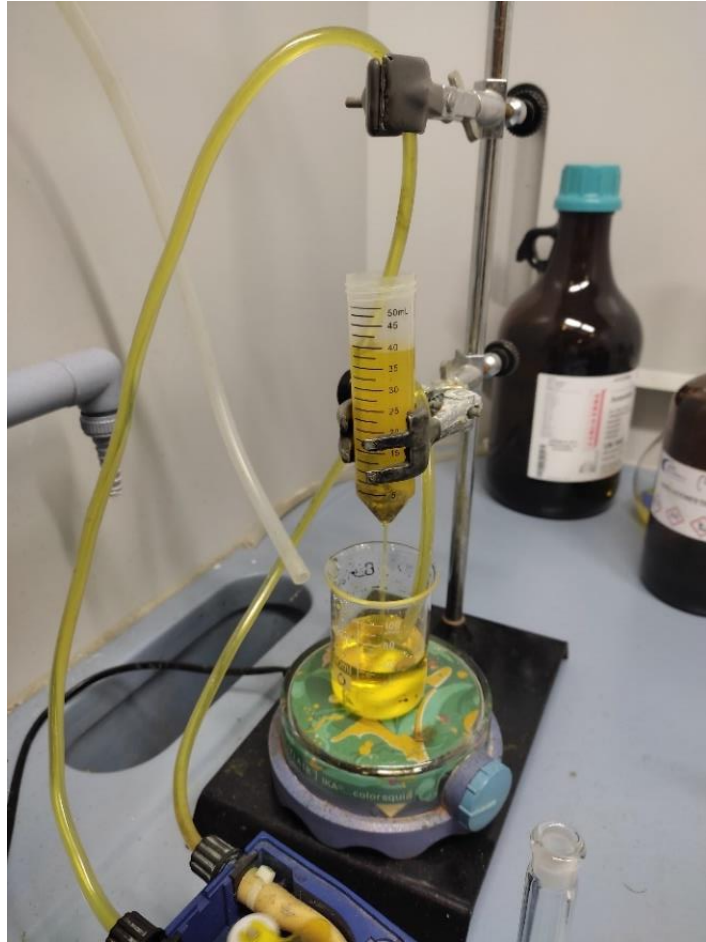
- Tubo Falcon de 50 mL para hacer la función de reactor.



**Figura 17:** Tubo Falcon colocado como reactor

### 3.1.3 Montaje experimental

El montaje experimental utilizado para llevar a cabo los experimentos fue el siguiente:



**Figura 18:** Montaje experimental

Como se puede observar en la **Figura 18**, disponemos de una bomba peristáltica que hace circular la disolución desde el vaso de precipitado de 100 mL, donde se encuentra esta, hasta el reactor que se encuentra arriba (tubo de centrifuga de tipo Falcon). El reactor es de un volumen de 50 mL, con una altura de 11.5 cm y un diámetro de 3 cm. Dentro del reactor se encuentra la lana de hierro. Una vez que pasa por el reactor y entra en contacto con la lana de hierro, vuelve a caer en el vaso de precipitado. La disolución se encuentra en agitación constante.

De la misma manera se realiza el experimento con la viruta de hierro.

### 3.2 Recta de calibrado de cromo en disolución

Antes de iniciar los experimentos, es necesario realizar una recta de calibrado para poder determinar la cantidad de cromo hexavalente en la disolución. Para ello, se deben de preparar previamente los siguientes reactivos y patrones:



*Solución patrón de cromo hexavalente:* se preparan muestras de 0 a 5 mg/L de Cr (VI) a partir de dicromato de sodio, enrasando con agua desionizada (agua destilada con adición de HNO<sub>3</sub> concentrado para ajustar el pH<2).

*Solución de Difenilcarbácida al 0.5% (m/v):* se pesan 50 mg de 1.5-difenilcarbácida y se disuelven en 10 mL de acetona.

*Solución de ácido sulfúrico 1:1 ó de 50%:* se toman 100 mL de ácido sulfúrico concentrado y se añaden 100 mL de agua (teniendo especial cuidado ya que se trata de una reacción exotérmica).

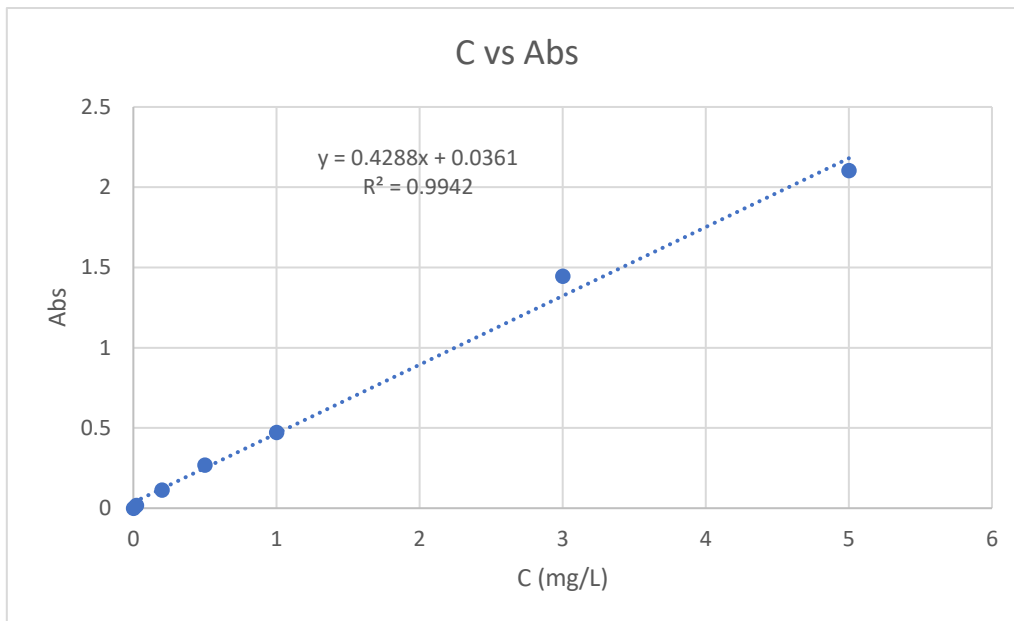
A continuación, se detalla el procedimiento a seguir:

1. Trasladar las disoluciones patrón a vasos de precipitado de 100 mL. Se añade a cada una de ellas 0.5 mL de ácido sulfúrico 1:1 y se agita con una varilla de vidrio. Se comprueba que el pH esté alrededor de 2.
2. Se añade 1 mL de solución de difenilcarbácida, se agita y se deja reposar entre 5 y 10 min hasta que se desarrolla color (rojo púrpura).
3. Se lee la absorbancia en el espectrofotómetro a 540 nm. El blanco será agua destilada a la que se le ha añadido 0.5 mL de ácido sulfúrico y 1 mL de difenilcarbácida.

Los resultados obtenidos fueron los siguientes:

C (mg/L)	Absorbancia
0	0
0.02	0.018
0.2	0.113
0.5	0.269
1	0.472
3	1.445
5	2.104

**Tabla 2:** Resultados calibrado del cromo hexavalente



**Figura 19:** Recta de calibrado

De esta forma, se obtiene la ecuación de la recta que relaciona los valores de concentración y absorbancia del cromo hexavalente:

$$y = 0.4288x + 0.0361 \quad (4)$$

Donde:

y: valor de la absorbancia medida en el espectrofotómetro

x: concentración del cromo hexavalente (mg/L)

### 3.3 Experimentos realizados con agua sintética

Todos los experimentos se llevaron a cabo siguiendo las mismas pautas:

- **Duración:** 30 o 90 minutos dependiendo del tipo de experimento.
- **Volumen disolución:** 100 mL.
- **pH:** el pH de la disolución inicial se ajustó a 1.5 (menos en el primer experimento) aumentando este según transcurre la reacción. Esto se realiza mediante la adición de ácido sulfúrico 1M.
- **Masa hierro:** entre 0.5 y 5 gramos.
- **Muestras espectrofotómetro:** se tomarán 0.5 mL de la disolución mediante una pipeta automática y se diluirán en 50 mL de agua desionizada (agua destilada con adición de HNO<sub>3</sub> concentrado para

ajustar el pH<2). A esta se le añadirá 0.5 mL de ácido sulfúrico 1:1 y se agitará. A continuación, se añadirá 1 mL de difenilcarbocida y se deja reposar entre 5 y 10 minutos para desarrollar color antes de medirlo en el espectrofotómetro a 540 nm.

Para asegurar la validez de los datos, la última muestra se mide dos veces en el espectrofotómetro, una diluyendo como se ha explicado anteriormente y otra sin diluir.

### 3.4 Experimentos realizados con agua de empresa

Tras analizar los resultados que se obtuvieron con agua sintética, se determinó cuál era la mejor relación lana de hierro volumen de disolución y se llevó a cabo el experimento para ver su eficacia.

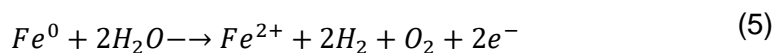
En estos experimentos no se ajustó el pH inicial de la disolución, sin embargo, se siguieron los demás pasos al igual que en el agua sintética.

# Resultados

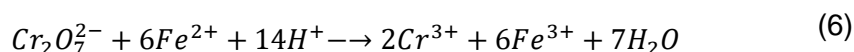
## 4. Resultados

Antes de comenzar con los resultados, cabe destacar que las reacciones que vamos a tener en los experimentos son las siguientes:

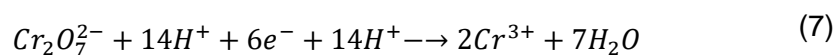
Por una parte, el hierro:



Los iones de hierro generados pueden reducir el cromo siguiendo la siguiente reacción:



También se puede producir la reducción de cromo:



### 4.1 Agua sintética

En este apartado se van a exponer los resultados obtenidos de los experimentos realizados con la disolución de dicromato de sodio preparada en el laboratorio.

#### 4.1.1 Tabla resumen

Las condiciones de los diferentes experimentos realizados son las que se muestran en la tabla siguiente:

Experimento	Reactivo	Masa (g)	pH inicial disolución	pH H <sub>2</sub> O	Volumen (mL)	Tiempo (min)
1	Lana	2.5	2	1.86	100	120
2	Lana	0.5	1.49	1.68	100	30
3	Lana	1	1.48	1.68	100	30
4	Lana	1.5	1.47	1.6	100	30
5	Lana	2	1.5	1.92	100	30
6	Lana	2.5	1.48	1.87	100	30
7	Lana	5	1.43	1.5	100	30
8	Viruta	1.5	1.4	1.4	100	90

Tabla 3: Tabla resumen condiciones experimentos agua sintética

#### 4.1.2 Experimento realizado sin cambiar pH inicial

El experimento 1 se realizó sin ajustar el pH inicial de la disolución de dicromato potásico, a un pH natural de 2. Se trata de un pH ácido, como hemos visto anteriormente por motivos de solubilidad del cromo en la disolución, siendo este insoluble a mayores valores de pH. Es por ello, que el primer experimento se ha querido realizar sin cambiar este valor, para ver cómo se comporta la disolución a este pH. Los resultados obtenidos fueron los siguientes:

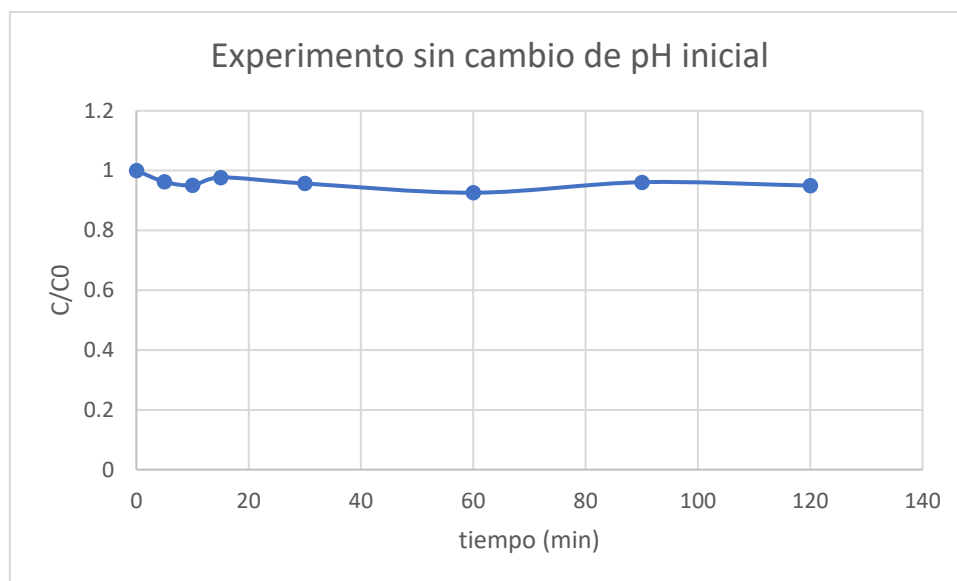


Figura 20: Reducción cromo (VI) con 2.5 g de lana de hierro a pH 2

El pH final de la disolución fue 2.

Como podemos observar en la **Figura 20**, a pH 2, en un periodo de 2 horas, solamente un 10% del cromo (VI) se reduce a cromo (III). Esto se debe a que las condiciones óptimas de pH no son las adecuadas ya que no es lo suficientemente ácido para favorecer la reducción. En los próximos experimentos se tendrá en cuenta intentando bajarlo a un pH de 1.5.

#### 4.1.3 Experimentos variando cantidad de lana

A continuación, se muestran los resultados obtenidos de los experimentos variando las concentraciones de lana de Fe desde 0.5 g a 5 g por 100 mL de disolución para determinar cuál es la cantidad mínima de lana de hierro para asegurar la velocidad de reducción. En estos se ha ajustado el pH inicial a uno más adecuado, alrededor de 1.5, como se muestra en la **Tabla 3**, lo cual no supone un problema a nivel industrial, ya que en este tipo de industrias se trabaja

a pH muy ácidos. En la siguiente figura se recogen los resultados obtenidos en los diferentes experimentos realizados:

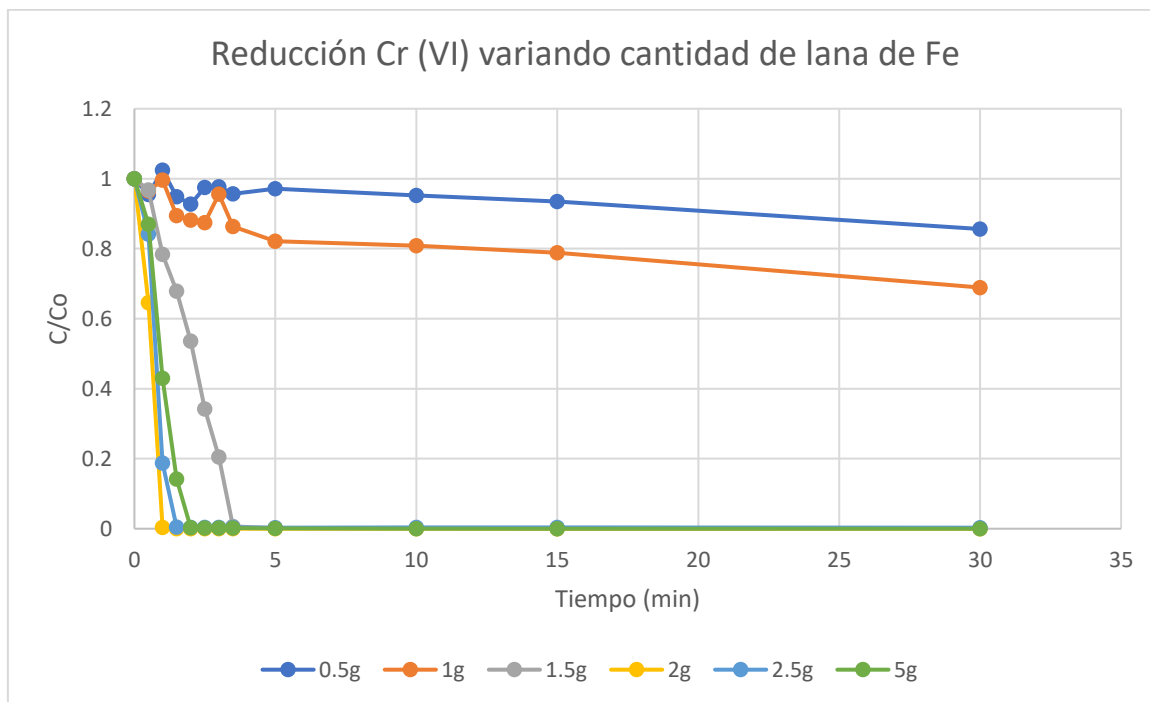
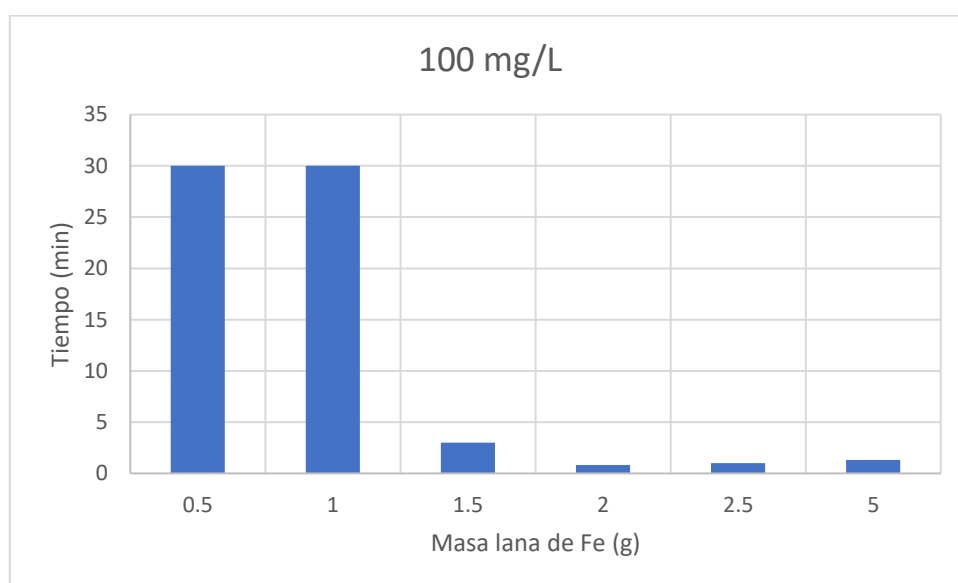


Figura 21: Experimentos variando la cantidad de lana de Fe a pH 1.5

Teniendo en cuenta lo que se muestra en la **Figura 21**, podemos decir que no es necesaria la máxima cantidad de lana de Fe para obtener una reducción rápida de cromo (VI). Aunque se esperaba que cuanto más cantidad de lana se utilizaba, hubiera mayor velocidad de reducción, podemos ver en la **Figura 21** que no es así. Esto se debe a que la lana se encuentra más compactada y el acceso al hierro esté más impedido, por lo tanto, pueden existir partes que no lleguen a estar en contacto con la disolución. En cuanto a la cantidad de 2.5 gramos, vemos que hay una ligera mejora a la de 5 gramos, consiguiendo reducir el Cr (VI) en menos de 2 minutos. La cantidad de 1.5 gramos, aun siendo más lenta que las anteriores, consigue reducir el Cr (VI) en menos de 5 min. Cantidades pequeñas como 0.5 g y 1 g, tardan demasiado, no consiguiendo llegar a reducir ni un 50% del cromo hexavalente en los 30 minutos en los que transcurre la reacción. Sin embargo, la concentración que mejor se comporta es la de 2 gramos. Esta es la que tiene el menor tiempo de reducción de todas las cantidades probadas.

También podemos decir que hay una relación entre la cantidad de lana de Fe con el pH. Cuanta mayor es la cantidad de lana de Fe empleada, más aumenta el pH final de la disolución. Esto es porque, como hemos visto anteriormente en las reacciones que tienen lugar, durante la semirreacción del Fe, se consumen  $H^+$ , que son los que aportan la acidez a la disolución. Por tanto, cuanto mayor lana de hierro, más protones se consumen y más baja la acidez.

A continuación, vamos a realizar una comparativa del tiempo necesario para reducir tres de cada cuatro partes de cromo (VI), es decir, en llegar a un valor de alrededor de 100 mg/L de Cr (VI).



**Figura 22:** Tiempo en reducir hasta los 100 mg/L de Cr (VI)

De la **Figura 22** podemos destacar que tanto 0.5 y 1 g de lana de hierro, no consiguen reducir el cromo (VI) hasta una cantidad de 100 mg/L en menos de 30 min. El que mejor funciona, como hemos dicho antes es a cantidad de 2 g. Sin embargo, la finalidad no es reducir el Cr (VI) en el menor tiempo posible, sino ver cuál es la menor cantidad de lana de hierro que podemos emplear para conseguir reducirlo de manera eficiente. En este caso, podríamos decir que la cantidad adecuada sería de 1.5 g.

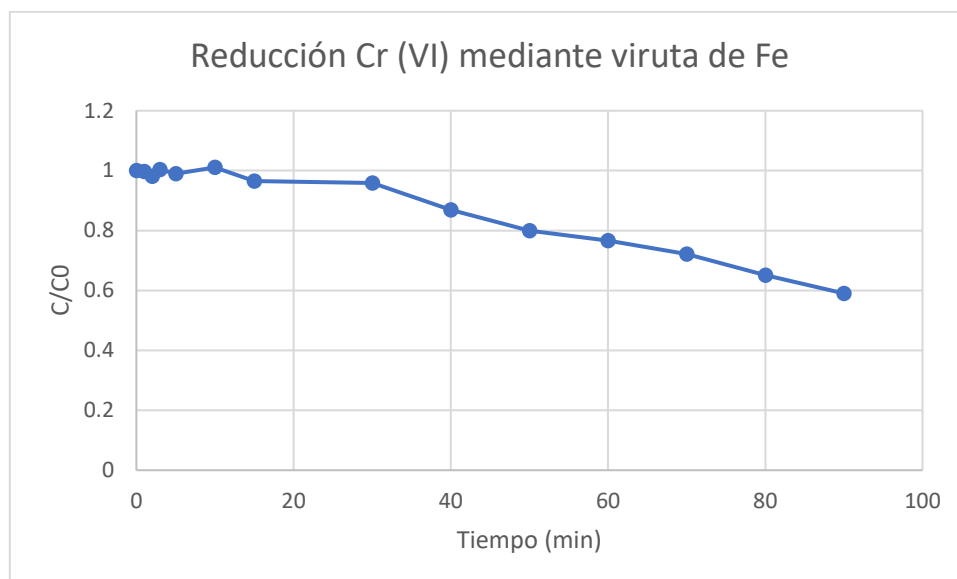
#### 4.1.4 Experimento con viruta de mecanizado

Como se ha comentado anteriormente, resulta interesante trabajar con viruta real procedente de procesos de mecanizado, porque es un residuo que se puede encontrar cerca de este tipo de empresa y abarata el coste. En este experimento,



teniendo en cuenta los resultados obtenidos en el apartado anterior, se ha escogido como cantidad de viruta de hierro para los experimentos 1.5 g. Se ha realizado, al igual que en los experimentos anteriores, ajustando el pH inicial de la disolución.

Los resultados obtenidos fueron los siguientes:



**Figura 23:** Reducción de cromo (VI) mediante viruta de Fe

Como podemos observar en la **Figura 23**, el resultado se aleja mucho a lo que habíamos obtenido antes con lana de hierro. Se ha llegado a reducir aproximadamente un 40% de cromo (VI) en 90 minutos de reacción. Como se podía apreciar en la **Figura 9**, el área superficial de la viruta es más pequeña que la de la lana de hierro. Por tanto, la cantidad de hierro que se activa es mucho menor (cuesta mucho más) y necesitaremos más cantidad de viruta para conseguir los mismos resultados que los obtenidos con la lana.

#### 4.2 Agua real de empresa

Como se ha comentado en el apartado de la parte experimental, se ha utilizado agua real de empresa con el fin de aproximarnos a un proceso real y comprobar la viabilidad del proceso. En los siguientes apartados, se presentan los diferentes los diferentes experimentos realizados y una tabla resumen con las diferentes condiciones llevadas a cabo en cada uno de ellos.

#### 4.2.1 Tabla resumen

Las condiciones en las que se realizaron los diferentes experimentos con agua real de empresa fueron las siguientes:

Experimento	Reactivo	Masa (g)	pH inicial disolución	pH H <sub>2</sub> O	Volumen (mL)	Tiempo (min)
9	Lana de Fe	2.5	0.4	1.38	100	30
10	Lana de Fe	5	0.4	1.68	100	30
11	Lana de Fe	1	0.4	1.62	100	90
12	Viruta de Fe	1	0.4	1.79	100	90
13	Viruta de Fe	1	0.4	1.39	100	90
14	Viruta de Fe	1	0.4	1.80	100	90

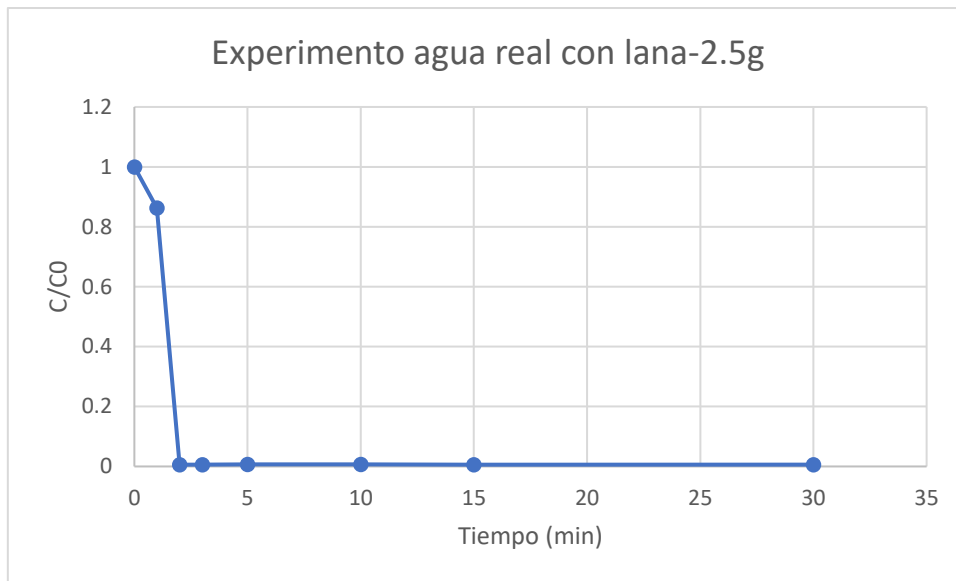
Tabla 4: Tabla resumen condiciones experimentos agua real de empresa

#### 4.2.2 Experimento agua real con lana-2.5g

En este experimento, se empleó lana de Fe con agua real de empresa de un pH inicial de 0.4. No se modificó el pH inicial de la disolución ya que a nivel de empresa no interesa añadir más reactivos, sino partir de la misma reduciendo así la cantidad de residuo u otros tratamientos posteriores.

Como partimos de una disolución que contiene más de 400 mg/L de cromo (VI), en estos experimentos hay que llevar a cabo una mayor dilución. Por ello, se han diluido 0.5 ml en 100 ml de agua desionizada. También hay que tener en cuenta que tras añadir la difenilcarbocida a la disolución, hay que medir en el espectrofotómetro en el menor tiempo posible, ya que esta reacciona con el contenido de la disolución y desaparece el color.

Los resultados fueron los siguientes:



**Figura 24:** Reducción cromo (VI) con 2.5 g de lana de hierro a pH 0.4

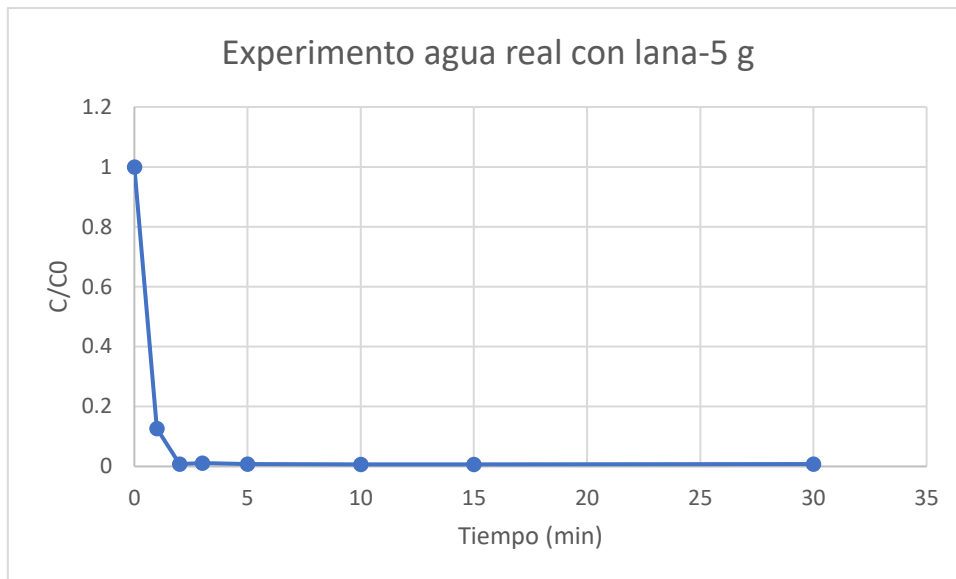
El pH final de la disolución fue de 3.62.

Como podemos observar en la **Figura 24**, con 2.5 g de lana de hierro conseguimos reducir el cromo (VI) a cromo (III). Podemos observar que la reacción es muy rápida, ya que en 2 minutos ya casi hemos conseguido llegar a la máxima reducción.

#### 4.2.3 Experimento agua real con lana-5 g

En este experimento, se utilizó lana de Fe con agua real de empresa. Si embargo, en este caso se modificó la masa de hierro, siendo esta de 5 g. Al igual que en el experimento anterior, en este tampoco se modificó el pH inicial y se diluyeron los 0.5 mL en 100 mL de agua desionizada.

Los resultados se muestran a continuación:



**Figura 25:** Reducción cromo (VI) con 5 g de lana de hierro a pH 0.4

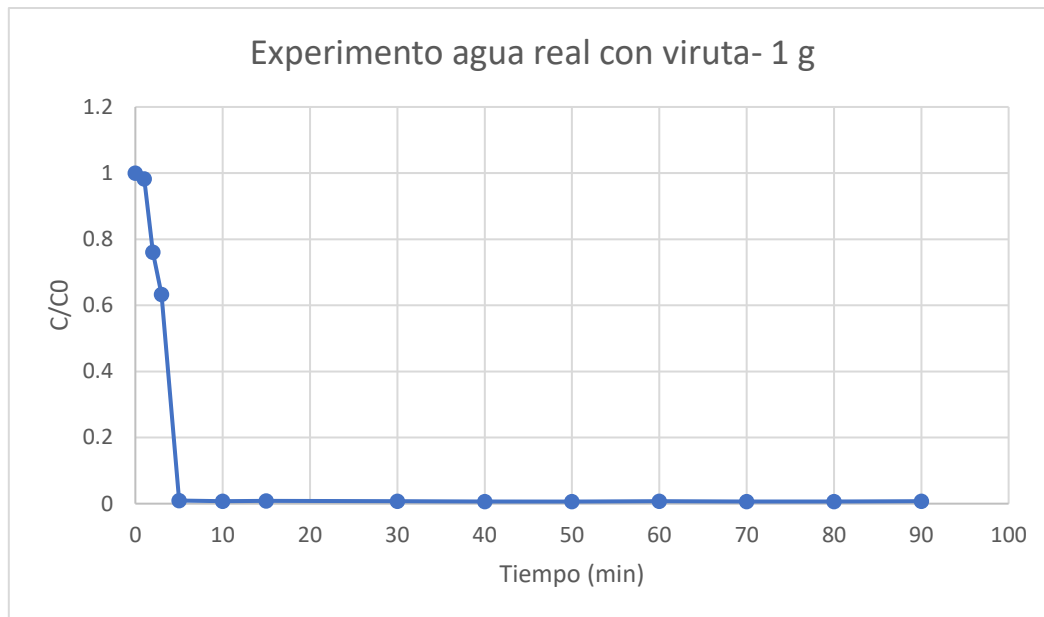
El pH final de la disolución fue de 3.68.

La reacción transcurre en menos tiempo que la anterior y de manera similar.

#### 4.2.4 Experimento agua real con lana-1 g

Tras ver los resultados obtenidos utilizando 2.5 y 5 g de lana de hierro, vamos a ver cómo transcurre la reacción con 1 g. Al igual que en los dos anteriores experimentos, no se modifica el pH inicial de la disolución y se mide la muestra en el espectrofotómetro lo antes posible.

Los resultados obtenidos fueron los siguientes:



**Figura 26:** Reducción cromo (VI) con 1 g de lana de hierro a pH 0.4

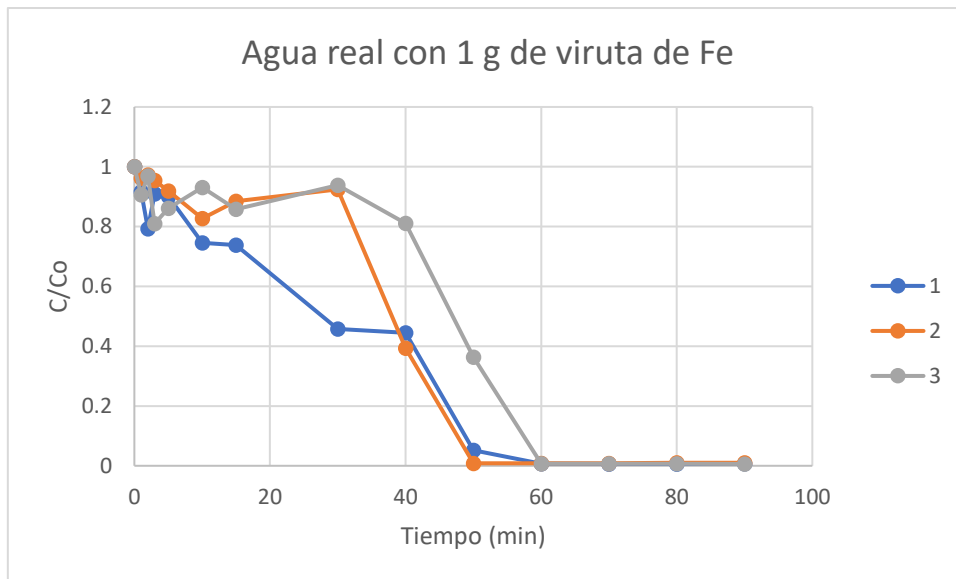
El pH final de la disolución fue de 2.28.

En este caso, tardamos más en reducir el Cr (VI), pero con dos minutos de diferencia.

#### 4.2.5 Experimentos agua real con viruta-1 g

Tras analizar los experimentos anteriores, se determinó que la cantidad óptima de lana de hierro era de 1 g, ya que la finalidad no es reducir el Cr (VI) en el menor tiempo posible, sino hacerlo utilizando la menor cantidad de lana. Con ello, aunque la reacción dure más tiempo, vamos a ver cómo se comporta la disolución utilizando 1 g de viruta de hierro. En estos experimentos tampoco se realizan cambios de pH.

Los resultados obtenidos fueron los siguientes:



**Figura 27:** Agua real de empresa utilizando 1 g de viruta de Fe

Como podemos observar, los tres casos difieren ligeramente. Las diferencias se deben mayoritariamente a que el residuo no es igual y uniforme en los tres experimentos ya que las partículas de hierro tienen diferentes tamaños y formas. Se ha intentado variar la uniformidad en los tres experimentos realizados para analizar si, a pesar de las diferencias de tamaño y forma se comportan igual a lo largo del tiempo. Por ello, podemos ver como a pesar de esto, aunque difiere ligeramente el comienzo, en todas se llega a la máxima reducción del Cr (VI) a los 60 min de reacción.

# **Escalado industrial**

## 5. Escalado industrial

Después de haber encontrado la mejor opción en cuanto a tipo y cantidad de hierro, procedemos a pasar de escala de laboratorio a escala industrial. Para ello, vamos a suponer como base de cálculo de 2.6 m<sup>3</sup> al mes. Este es un dato que se asemeja al volumen que trata la empresa, ya que este dato ha sido suministrado por el personal. Con esto, los dos modelos, tanto el de laboratorio como el industrial, deben ser similares. Para asegurar la similaridad se debe de satisfacer la similaridad geométrica de los límites físicos.

Dado que se trata de un volumen de residuo pequeño y un tiempo de tratamiento reducido, nos permitiría concentrar el tratamiento de todo un mes en muy poco tiempo o ir tratando en diversos días. Por ello, hemos supuesto tres escenarios posibles: que el tratamiento se llevara a cabo en un día, una vez a la semana o tratar una cantidad todos los días. También hay que tener en cuenta que el transporte de la viruta de hierro es en grandes cantidades.

### 5.1 Cálculos

#### 5.1.1 Tratando el residuo cada día

Como hemos dicho en el apartado anterior, para pasar de escala de laboratorio a escala industrial vamos a aplicar el criterio de similaridad geométrica (Santos-Juanes, Vicente, & Sciscenko, 2021):

$$m' = k \cdot m \quad (8)$$

Donde:

$m'$  = Variable a escala industrial

$k$  = Factor de escalado

$m$  = Variable a escala de laboratorio

El volumen a tratar a escala industrial es de 2.6 m<sup>3</sup> al mes. Este dividido en 22 días hábiles laborables serían 0.118 m<sup>3</sup> en un día. Teniendo en cuenta que el tiempo de tratamiento son 90 minutos, de los cuales 60 minutos corresponden a la reacción y 30 a carga, descarga y limpieza del reactor, y la mayoría de las empresas trabajan 8 horas diarias, se harán 5 cargas para tratar los 118L.



Una vez que tenemos claro el volumen a escala industrial (23.64 L) y el volumen a escala de laboratorio (0.1 L), procedemos a calcular el factor de escalado:

$$23.64L = k \cdot 0.1L \rightarrow k = 236.36 \quad (9)$$

Teniendo el valor del factor de escalado, podemos obtener la cantidad de viruta de hierro y el caudal necesario a nivel industrial. Para el caso de la viruta, que a nivel de laboratorio se utilizaba 1 gramo, serán necesarios 236.36 gramos, es decir, 0.24 kg. En cuanto al caudal, que a escala de laboratorio era de 2.028 mL/s, a escala industrial será de 479.29 mL/s, 0.48 L/s.

A continuación, vamos a calcular la geometría del reactor para que se puedan llevar a cabo las mismas condiciones de reacción que a escala de laboratorio. Para ello, hacemos uso de la relación altura-diámetro (H/D) del reactor.

Como a escala de laboratorio se ha utilizado un tubo tipo Falcon de diámetro D= 3 cm y una altura de H= 11.5 cm:

$$\frac{H}{D} = \frac{11.5}{3} = 3.83 \quad (10)$$

Además, como también es conocido el volumen de este, siendo de 50 mL, podemos calcular la relación entre el volumen total de disolución (V) y el volumen que es capaz de albergar el reactor en su interior ( $V_r$ ):

$$\frac{V}{V_r} = \frac{100}{50} = 2 \quad (11)$$

Una vez conocemos el valor de la relación  $V/V_r$ , ya podemos calcular el valor del volumen capaz de entrar en el reactor a escala industrial, el cual será de 11.82 L.

Sabiendo que el volumen del cilindro es:

$$V_c = \pi \cdot R^2 \cdot H \quad (12)$$

Donde:

$V_c$  = Volumen del cilindro

$R$  = Radio del cilindro

$H$  = Altura del cilindro

Y, sabiendo que se debe de cumplir la relación H/D anterior, despejando la H de esta ecuación y haciendo uso de la herramienta 'Solver' de Excel para obtener un valor de volumen de  $0.0118 \text{ m}^3$ , obtenemos tanto el diámetro como la altura del reactor, siendo estas de 0.16 m y 0.61 m respectivamente.

#### 5.1.2 Tratando el residuo una vez por semana

Teniendo en cuenta lo del apartado anterior, pero esta vez realizando el tratamiento una vez por semana, si dividimos los  $2.6 \text{ m}^3$  entre los cuatro días que se realizará el tratamiento, obtenemos un volumen de residuo de  $0.65 \text{ m}^3$  a tratar en un día. Al igual que en el apartado anterior, se realizarán 5 cargas.

El volumen a escala industrial será de 130 L. Mediante la ecuación (8), volvemos a calcular el factor de escalado, que en este caso tendrá un valor de 1300. A partir de este calculamos la cantidad de lana de hierro, que será de 1300 gramos, es decir, de 1.3 kg. El siguiente paso es calcular el caudal industrial, siendo este de 2636.11 mL/s, 2.64 L/s.

En cuanto a la geometría del reactor, haciendo uso de la ecuación (10), obtenemos una relación H/D de 3.83. La relación  $V/V_r$  será la misma que en el apartado anterior, siendo esta de 2. Por tanto, el valor del volumen que es capaz de albergar el reactor en su interior a nivel industrial será de 65 L.

Con todos estos valores, y haciendo uso de la herramienta 'Solver' de Excel, obtenemos un reactor de diámetro 0.28 m y una altura de 1.07 m.

#### 5.1.3 Tratando el residuo una vez al mes

Por último, vamos a estudiar las dimensiones del reactor teniendo en cuenta que el residuo solamente se tratara una vez al mes. Para ello, dividimos los  $2.6 \text{ m}^3$  entre las 5 cargas que hay al día, obteniendo un volumen de escala industrial de 520 L. Calculamos de nuevo mediante la ecuación (8) el factor de escalado siendo este de 5200.

Mediante este calculamos la cantidad de viruta de hierro, 5.2 kg, y el caudal necesario a nivel industrial, 10.54 L/s.

En cuanto a la geometría del reactor, el volumen capaz de albergar el reactor es de 260 L.

De nuevo, obtenemos el diámetro y la altura del reactor, siendo estas de 0.44 m y 1.69 respectivamente.

#### 5.1.4 Tabla resumen escalado

	Tratamiento diario	Tratamiento semanal	Tratamiento mensual
Volumen diario (L)	118	650	2600
Cantidad viruta Fe (kg)	0.24	1.3	5.2
Caudal (L/s)	0.48	2.64	10.54
Volumen disolución (L)	23.64	130	520
Volumen reactor (L)	11.82	65	260
Diámetro (m)	0.16	0.28	0.44
Altura (m)	0.61	1.07	1.69

Tabla 5: Tabla resumen resultados escalado (Caso 1)

#### 5.2 Diagrama de flujo

En la siguiente figura se muestra el diagrama de flujo de la planta a nivel industrial con sus componentes y corrientes.

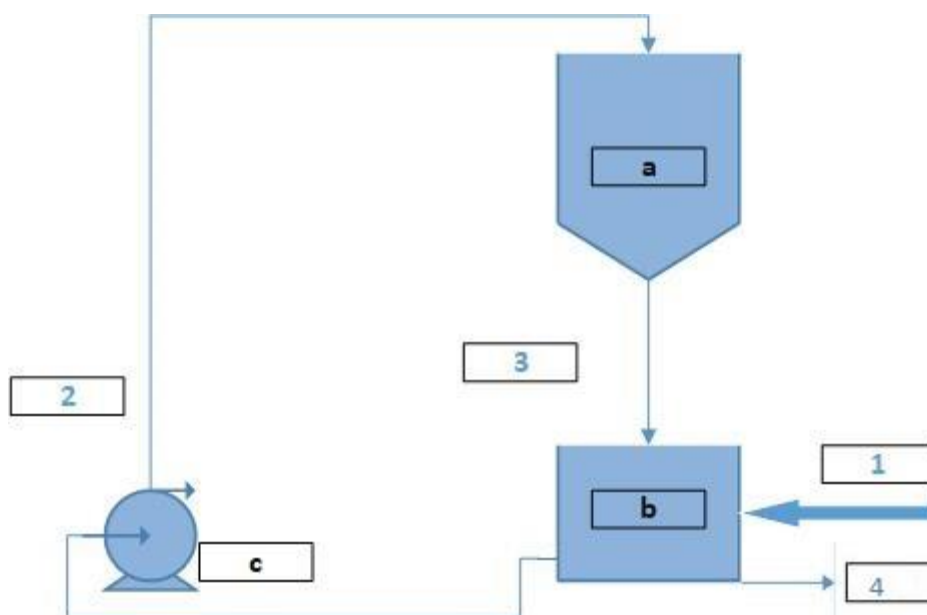


Figura 28: Diagrama de flujo del proceso

Equipos:

- a) Reactor de resina epoxi con fibra de vidrio que contiene la lana de hierro
- b) Depósito que contiene la disolución
- c) Bomba centrífuga que hace recircular el líquido

Corrientes:

1. Entrada del residuo al comienzo del proceso
2. Bombeo desde el depósito al reactor
3. Caída del líquido del reactor al depósito
4. Salidas de los residuos al final del proceso

# **Estudio económico**

## 6. Estudio económico

Tras obtener las medidas a escala industrial, vamos a realizar un estudio económico para determinar los diferentes costes existentes para llevar a cabo la reducción de Cr (VI) a gran escala y ver su rentabilidad. Para ello, vamos a analizar los tres casos anteriores, es decir, realizando un tratamiento diario del residuo, realizando un tratamiento semanal o un tratamiento mensual. Vamos a analizar los diferentes gastos de material, personal y demás elementos necesarios para el correcto funcionamiento de la planta.

### 6.1 Estudio económico del tratamiento diario

A continuación, vamos a hacer el estudio económico del primer caso, suponiendo que los residuos son tratados todos los días. Para ello, vamos a estudiar los gastos de inversión, los gastos de explotación y los gastos totales necesarios para poner en marcha la planta de reducción de cromo hexavalente.

#### 6.1.1 Gastos de inversión

Los gastos de inversión son aquellos gastos destinados a la construcción de infraestructuras y a la adquisición o creación de bienes necesarios para el funcionamiento de los servicios y otros gastos que tienen una duración a largo plazo (rendición de cuentas, s.f.). En este caso, nuestros gastos de inversión estarán relacionados con el reactor donde se llevará a cabo la reducción del Cr (VI), la bomba centrífuga que hará recircular la disolución y el depósito donde estará la disolución.

En el caso del reactor, se ha elegido un reactor cilíndrico de resina epoxi con fibra de vidrio, ya que este material no presenta ningún inconveniente a la hora de llevar a cabo la reducción, ya que es un material inerte frente a los procesos de reducción y no altera el potencial del hierro. En este caso, hay que tener en cuenta que, aunque el reactor teórico tiene un volumen de 11.82 L, este volumen no se encuentra disponible en el mercado. Por ello, el reactor que se ha escogido para este caso es un reactor de 20 L. Estos reactores suelen costar alrededor de 800 €.

En cuanto al depósito, se ha escogido un depósito de acero inoxidable utilizado en el ámbito del aceite, vino y cerveza. Estos depósitos cumplen con las características necesarias para contener la disolución, ya que están dotados de

una válvula inoxidable para la salida del líquido, una tapa inferior para facilitar la limpieza y preparación posterior para el siguiente experimento, y una tapa superior de cierre con brida para protegerlo del polvo cuando no esté en uso.

Teniendo en cuenta que el volumen teórico del depósito es de 23.64 L, se ha seleccionado el depósito de 35 L. Este tiene un diámetro de 318 mm y una altura de 450 mm. Su precio es de 173€ (Via, 2022).

Por último, la bomba seleccionada se ha elegido teniendo en cuenta el caudal teórico y las dimensiones del reactor y del depósito, ya que tiene que aportar la altura suficiente como para que la disolución llegue al reactor. Con esto, la bomba seleccionada es la bomba centrífuga serie C, modelo C60, que cuenta con un caudal máximo de 1.67 L/s, una potencia de 0.37 kW y una altura máxima de 22 metros. Esta tiene un precio de 207.90 € (Electrobombas, s.f.).

En la siguiente tabla se resumen todos los elementos seleccionados y sus precios:

CONCEPTO	IMPORTE €
Reactor (20 L)	800
Depósito (35 L)	173
Bomba	207.90
<b>Total</b>	<b>1180.90</b>

Tabla 6: Elementos de la planta junto con el precio (Caso 1)

Una vez conocemos todos los elementos necesarios y sus características, podemos calcular el gasto de inversión y suponiendo que estos equipos tendrán una vida útil de 10 años.

Por tanto, el gasto de inversión se calcula como:

$$GI = \frac{I}{U} \quad (13)$$

Donde:

GI = Gastos de inversión (€/año)

I = Inversión inicial (€)

U = Vida útil de la planta (años)

Sabiendo que la inversión inicial es de 1180.90€ y la vida útil de la planta es de 10 años, el gasto de inversión será de 118.09 €/año.

### 6.1.2 Gastos de explotación

Se definen como gastos de explotación aquellos gastos en los que incurre una empresa para el desarrollo de su actividad principal (Sánchez, s.f.). Estos gastos están relacionados con la actividad de la empresa ya que son necesarios para llevar a cabo las actividades para las que se ha fundado.

#### 6.1.2.1 Costes fijos

Los costes fijos son aquellos que se deben asumir independientemente de la producción de la empresa. Estos costes son los costes del personal, de amortización y de mantenimiento.

##### 6.1.2.1.1 Costes de personal

Para calcular el coste del personal, se va a tener en cuenta el porcentaje de tiempo que este dedica a esta parte de la empresa. Se dedicará a otras labores en la empresa mientras no se necesite mano de obra en el proceso de reducción. Por tanto, como hemos dicho anteriormente, en este escenario, se trabajan 8 horas diarias para tratar un volumen de 118 L dividido en 5 cargas. El personal será necesario para realizar las labores de limpieza, carga y descarga.

Los gastos necesarios para el personal son varios. Entre ellos tenemos el salario base el cual en España está recogido en el Boletín Oficial del Estado (BOE) núm. 101 Sec. III pág. 57859, que es de 15826.34 €/año. Sin embargo, hay que añadir que la empresa se debe de hacer cargo del pago a la Seguridad social por trabajador de contingencias comunes, que corresponde a un 23.60% del salario bruto, una cotización por formación del 0.60%, cotización por desempleo, 5.50% en contratos indefinidos y la cotización al Fondo de Garantía Salarial (FOGASA) que corresponde al 0.20% del salario (Quipu, s.f.). Teniendo en cuenta que el trabajador en este escenario solo tendrá que acudir un total de 2.5 h:

CONCEPTO	COSTE 8 h (€/año)	Coste 2.5 h diarias (€/año)
Salario base (€/año)	15826.34	4945.73
Cot. Contingencias comunes	3735.02	1167.19



Cot. Por formación	94.96	29.67
Cot. Por desempleo	870.45	272.02
FOGASA	3165.27	989.15
Total	23692.03	7403.76

Tabla 7: Salario anual por trabajador por parte de la empresa (Caso 1)

Por tanto, el coste de personal será de 7403.76 €/año.

#### 6.1.2.1.2 Costes de amortización

Los costes de amortización se deben a la pérdida de valor que sufren los activos fijos de una empresa a lo largo del tiempo debido al desgaste o uso de estos durante el proceso productivo. Estos se calculan de la siguiente manera:

$$A = \frac{GI}{V} \quad (14)$$

Donde:

A = Gastos de amortización (€/m<sup>3</sup>)

GI = Gastos de inversión (€/año)

V = Volumen anua tratado de agua residual (m<sup>3</sup>/año)

Teniendo en cuenta que al mes tenemos un volumen de residuo de 2.6 m<sup>3</sup>, al año tendremos una cantidad de 31.2 m<sup>3</sup>. Sabiendo el volumen anual y el gasto de inversión calculado en el apartado anterior, tenemos un coste de amortización de 3.78 €/m<sup>3</sup>.

#### 6.1.2.1.3 Costes de mantenimiento

Este coste tiene la finalidad de garantizar el perfecto estado de la maquinaria para su perfecto funcionamiento durante el proceso. El objetivo es garantizar el proceso de producción evitando de esta forma pérdidas y parada de actividad. Dentro de estos costes no se tienen en cuenta incidencias cubiertas por el seguro de la maquinaria. Corresponde generalmente al 2% del gasto de amortización. De esta manera, sabiendo que los gastos de amortización son de 3.78 €/m<sup>3</sup>, el gasto de mantenimiento será de 0.076 €/m<sup>3</sup>.

### 6.1.2.2 Costes variables

Los costes variables son aquellos que varían en función de la producción. Aquí podemos encontrar dos tipos de costes variables: energéticos y de material y productos químicos.

#### 6.1.2.2.1 Costes energéticos

Los costes energéticos son aquellos que se calculan a partir de la energía necesaria para llevar a cabo el funcionamiento de la planta. Para ello, es necesario conocer la potencia utilizada durante el proceso, el coste de esta y el tiempo por el cual está en marcha.

El coste de la potencia según la Empresa Nacional de Electricidad Sociedad Anónima (ENDESA) es de 0.215 €/ kW·h (ENDESA, 2022). Teniendo en cuenta que la potencia de la bomba es de 0.37 kW y esta está en marcha 5 horas diarias durante 249 días laborables anuales, además de que el volumen anual tratado es de 31.2 m<sup>3</sup>, podemos calcular el coste energético de la siguiente manera:

$$G_E = \frac{C_p \cdot W \cdot D \cdot t}{V} \quad (15)$$

Donde:

$G_E$  = Gasto energético (€/m<sup>3</sup>)

$C_p$  = Coste de la potencia (€/kW·h)

$W$  = Potencia de la planta (kW)

$D$  = Días de trabajo anuales (días/años)

$t$  = Horas trabajadas al día (h/día)

$V$  = Volumen anual tratado (m<sup>3</sup>/año)

Por tanto, aplicando la ecuación anterior, obtenemos que los gastos energéticos son de 3.17 €/m<sup>3</sup>. Si tenemos en cuenta el coste energético anual, este sería de 99.04 €/año.

#### 6.1.2.2.2 Costes de material

Uno de los gastos más importantes es el gasto material necesario para efectuar la reducción del Cr (VI). Los productos necesarios para efectuar la reducción son la lana o la viruta de hierro. En el caso de utilizar lana de hierro, hay que tener

en cuenta los costes y la cantidad necesaria para tratar el volumen de agua. El precio aproximado es de 6 €/kg, siendo necesarios 10 kg para tratar 1 m<sup>3</sup>. Por tanto, teniendo en cuenta que el volumen anual es de 31.2 m<sup>3</sup>, al año el gasto de material sería de 1872 €/año.

Por el contrario, si hacemos uso de viruta de hierro, suponemos que este es de 0 €, ya que se trata de un desecho industrial. Por tanto, resumiendo los costes de material:

Material	Precio (€/kg)	Cantidad para tratar 1 m <sup>3</sup> (kg)	Coste anual (€/año)
Lana	6	10	1872
Viruta	0	10	0

Tabla 8: Costes material (Caso 1)

### 6.1.3 Costes totales

El coste total de la planta será la suma de los gastos de inversión y operación.

El coste de operación será:

$$G_O = G_P + G_M + G_E + G_{MAT} \quad (16)$$

Donde:

$G_O$  = Gastos de operación (€/año)

$G_P$  = Gasto del personal (€/año)

$G_M$  = Gasto de mantenimiento (€/año)

$G_E$  = Gasto energético (€/año)

$G_{MAT}$  = Gasto de material

Para calcular el coste de operación, vamos a tener en cuenta dos casos. Un primer caso donde el material utilizado es la lana y un segundo caso, donde el material empleado sea la viruta.

Por tanto, en el primer caso el coste de operación anual será de 9377.16 €/año.

Para el segundo caso, el coste de operación anual será de 7505.16 €/año.

Finalmente, los gastos totales serán la suma de los gastos de inversión más los gastos de operación.

$$C_T = G_I + G_O \quad (17)$$

Los resultados se presentan en la siguiente tabla:

CONCEPTO	Precio anual (€/año)	Precio m <sup>3</sup> (€/m <sup>3</sup> )
Coste totales caso lana	9495.25	304.33
Costes totales caso viruta	7623.25	244.33

Tabla 9: Costes totales tratamiento diario del residuo (Caso 1)

## 6.2 Estudio económico del tratamiento semanal

Vamos a estudiar a continuación el segundo escenario, en el cual el residuo es tratado una vez por semana. Para ello, vamos a volver a estudiar de nuevo todos los gastos como en el apartado anterior.

### 6.2.2 Gastos de inversión

En este caso, el reactor sigue siendo un reactor cilíndrico de vidrio. Sin embargo, esta vez tendrá un volumen de 80 L, lo que supone un coste aproximado de 700€. En cuanto al depósito, este sigue teniendo las mismas propiedades, pero diferente volumen. El volumen del depósito en este caso es de 150 L, con una altura de 806 mm y un diámetro de 504 mm, y un coste de 197.5 € (Via, 2022). En cuanto a la bomba, el modelo elegido es el Serie C, modelo C60, que consta de un caudal máximo de 3.55 L/s, una potencia de 2.98 kW y una altura máxima de 66.9 m. El precio de esta es de 768.28 € (Electrobombas, s.f.).

CONCEPTO	IMPORTE €
Reactor (80 L)	700
Depósito (150 L)	197.5
Bomba	768.28
<b>Total</b>	<b>1665.78</b>

Tabla 10: Elementos de la planta junto con el precio (Caso 2)

Haciendo uso de la ecuación 13, tenemos unos gastos de inversión de 166.58 €/año.

### 6.2.3 Gastos de explotación

#### 6.2.3.1 Costes fijos

En este caso habrá variación en cuanto a los costes del personal, de amortización y de mantenimiento. A continuación, vamos a ver cada uno de ellos.

##### 6.2.3.1.1 Costes de personal

En este caso el personal le dedicará a este proceso un día a la semana. Por ello, los costes serán menores que en el escenario anterior. En este caso, aplicando el porcentaje dedicado por el trabajador a esta parte de la empresa tenemos:

CONCEPTO	COSTE 8 h (€/año)	Coste 2.5 h semanales (€/año)
Salario base (€/año)	15826.34	989.15
Cot. Contingencias comunes	3735.02	233.44
Cot. Por formación	94.96	5.93
Cot. Por desempleo	870.45	54.40
FOGASA	3165.27	197.83
Total	23692.03	1480.75

Tabla 11: Salario anual por trabajador por parte de la empresa (Caso 2)

Por tanto, tenemos un gasto de personal de 1480.75 €/año.

##### 6.2.3.1.2 Costes de amortización

En este caso, al mes tenemos el mismo volumen de residuo que en el caso anterior, de 2.6 m<sup>3</sup>, y al año una cantidad de 31.2 m<sup>3</sup>. Sabiendo el volumen anual y el gasto de inversión calculado en el apartado anterior y aplicando la ecuación 14, tenemos un coste de amortización de 5.34 €/m<sup>3</sup>.

##### 6.2.3.1.3 Costes de mantenimiento

Conociendo el gasto de amortización (5.34 €/m<sup>3</sup>), y sabiendo que el coste de mantenimiento corresponde al 2% de este, tenemos un coste final de mantenimiento de 0.107 €/m<sup>3</sup>.

### 6.2.3.2 Costes variables

#### 6.2.3.2.1 Costes energéticos

En este caso, la potencia de la bomba cambia siendo esta de 2.98 kW. Los días laborables serán 52 y el volumen anual tratado de 31.2 m<sup>3</sup>. Aplicando la ecuación 15, tenemos un gasto energético de 5.34 €/m<sup>3</sup>, 166.58 €/año.

#### 6.2.3.2.2 Costes de material

En este caso el coste del material no varía, ya que se trata la misma cantidad de residuo.

Material	Precio (€/kg)	Cantidad para tratar 1 m <sup>3</sup> (kg)	Coste anual (€/año)
Lana	6	10	1872
Viruta	0	10	0

Tabla 12: Costes material (Caso 2)

### 6.2.4 Costes totales

Aplicando la ecuación 16, obtenemos unos gastos de operación de 3522.67€/año en el caso del uso de lana de hierro y 1650.67 €/año en el caso de la viruta de hierro.

Aplicando la ecuación 17, se obtienen los costes totales del proceso y que se resumen en la siguiente tabla:

CONCEPTO	Precio anual (€/año)	Precio m <sup>3</sup> (€/m <sup>3</sup> )
Coste totales caso lana	3689.24	118.24
Costes totales caso viruta	1817.24	58.24

Tabla 13: Costes totales tratamiento diario del residuo (Caso 2)

## 6.3 Estudio económico del tratamiento mensual

Vamos a estudiar a continuación el tercer escenario, en el cual el residuo es tratado una vez al mes. Para ello, vamos a volver a estudiar de nuevo todos los gastos como en los apartados anteriores.

### 6.3.2 Gastos de inversión

El reactor cilíndrico de vidrio de volumen de 300 L, lo que supone un coste aproximado de 1200€. En cuanto al depósito, este sigue teniendo las mismas propiedades, pero diferente volumen. El volumen del depósito en este caso es de 600 L, con una altura de 1210 mm y un diámetro de 796 mm, y un coste de 409 € (Via, 2022). En cuanto a la bomba, el modelo elegido es el Serie CS 150/2, que consta de un caudal máximo de 11.67 L/s, una potencia de 1.1 kW y una altura máxima de 9.1 m. El precio de esta es de 360 € (AGP, s.f.).

CONCEPTO	IMPORTE €
Reactor (300 L)	1200
Depósito (600 L)	409
Bomba	360
<b>Total</b>	<b>1969</b>

Tabla 14: Elementos de la planta junto con el precio (Caso 3)

Haciendo uso de la ecuación 13, tenemos unos gastos de inversión de 196.9 €/año.

### 6.3.3 Gastos de explotación

#### 6.3.3.1 Costes fijos

En este caso, al igual que en el caso anterior, habrá variación en cuanto a los costes del personal, de amortización y de mantenimiento. A continuación, vamos a ver cada uno de ellos.

##### 6.3.3.1.1 Costes de personal

En este caso el personal le dedicará a este proceso un día al mes. Por ello, los costes serán menores que en los dos escenarios anteriores disminuyendo de manera significativa los gastos por trabajador. En este caso, aplicando el porcentaje dedicado por el trabajador a esta parte de la empresa tenemos:

CONCEPTO	COSTE 8 h (€/año)	Coste 2.5 h mensuales (€/año)
Salario base (€/año)	15826.34	247.29
Cot. Contingencias comunes	3735.02	58.36
Cot. Por formación	94.96	1.48

Cot. Por desempleo	870.45	13.60
FOGASA	3165.27	49.46
Total	23692.03	370.19

Tabla 15: Salario anual por trabajador por parte de la empresa (Caso 3)

Por tanto, tenemos un gasto de personal de 370.19 €/año.

#### 6.3.3.1.2 Costes de amortización

En este caso, al mes tenemos el mismo volumen de residuo que en el caso anterior, de 2.6 m<sup>3</sup>, y al año una cantidad de 31.2 m<sup>3</sup>. Sabiendo el volumen anual y el gasto de inversión calculado en el apartado anterior y aplicando la ecuación 14, tenemos un coste de amortización de 6.31 €/m<sup>3</sup>.

#### 6.3.3.1.3 Costes de mantenimiento

Conociendo el gasto de amortización (6.31 €/m<sup>3</sup>), y sabiendo que el coste de mantenimiento corresponde al 2% de este, tenemos un coste final de mantenimiento de 0.126 €/m<sup>3</sup>.

#### 6.3.3.2 Costes variables

##### 6.3.3.2.1 Costes energéticos

En este caso, la potencia de la bomba cambia siendo esta de 1.10 kW. Los días laborables serán 12 y el volumen anual tratado de 31.2 m<sup>3</sup>. Aplicando la ecuación 15, tenemos un gasto energético de 0.45 €/m<sup>3</sup>, 14.19 €/año.

##### 6.3.3.2.2 Costes de material

En este caso el coste del material tampoco varía, siendo este el mismo que en los casos anteriores.

Material	Precio (€/kg)	Cantidad para tratar 1 m <sup>3</sup> (kg)	Coste anual (€/año)
Lana	6	10	1872
Viruta	0	10	0

Tabla 16: Costes material (Caso 3)

#### 6.3.4 Costes totales

Aplicando la ecuación 16, obtenemos unos gastos de operación de 2260.32 €/año en el caso del uso de lana de hierro y 388.32 €/año en el caso de la viruta de hierro.



Aplicando la ecuación 17, se obtienen los costes totales del proceso y que se resumen en la siguiente tabla:

CONCEPTO	Precio anual (€/año)	Precio m <sup>3</sup> (€/m <sup>3</sup> )
Coste totales caso lana	2457.22	78.76
Costes totales caso viruta	585.22	18.76

Tabla 17: Costes totales tratamiento diario del residuo (Caso 3)

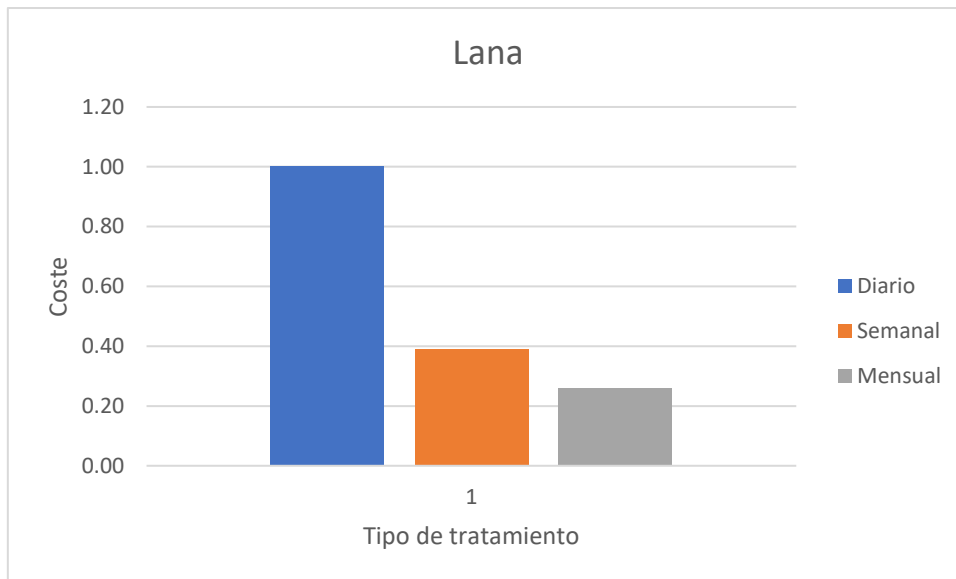
#### 6.4 Tabla resumen estudio económico

Escenario	Material	Coste total (€/m <sup>3</sup> )
T. diario	Lana	304.33
T. diario	Viruta	244.33
T. semanal	Lana	118.24
T. semanal	Viruta	58.24
T. mensual	Lana	78.76
T. mensual	Viruta	18.76

Tabla 18: Resumen costes totales de todos los escenarios

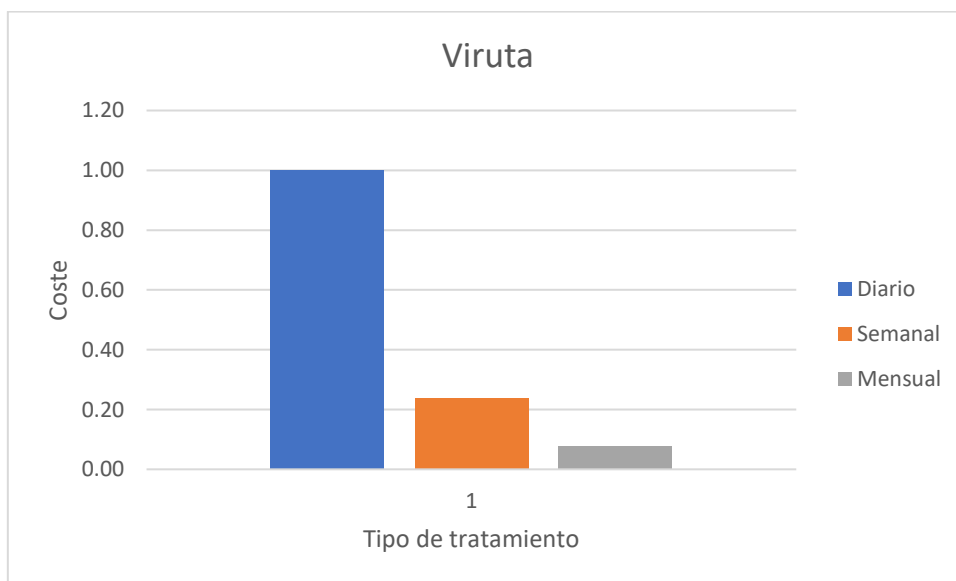
Como podemos observar en la **Tabla 18**, el escenario más barato es realizando el tratamiento de reducción del Cr (VI) una vez al mes y utilizando viruta de hierro. El siguiente más barato sería realizando el tratamiento una vez a la semana utilizando lana de hierro seguido del tratamiento mensual con lana. Los demás escenarios superan los 100 €/m<sup>3</sup>, siendo el más caro el tratamiento diario mediante lana con un coste de 304.33 €/m<sup>3</sup>. Estas grandes diferencias, se deben en su mayoría por el gasto de personal, ya que no es lo mismo necesitar al trabajador una vez al mes que todos los días. Otra diferencia es el uso de lana y viruta, siendo el segundo caso más barato. Esto es porque al ser un residuo es prácticamente gratis. Otra pequeña diferencia es la potencia de la bomba, ya que repercute en el gasto de la luz.

A continuación, vamos a realizar una comparación del ahorro que supone cada tipo de tratamiento usando lana y viruta normalizando el coste más alto:



**Figura 29:** Ahorro de cada tratamiento utilizando lana

Como podemos ver en la **Figura 29**, al pasar de tratamiento diario al semanal conseguimos un ahorro del 61 %, mientras que si pasamos del diario al mensual el ahorro es mucho mayor, siendo este del 74%.



**Figura 30:** Ahorro de cada tratamiento utilizando viruta

Vamos a comparar ahora el ahorro de cada tratamiento utilizando viruta. En la **Figura 30**, podemos observar como el ahorro del diario al semanal es del 76 %. El mayor ahorro es pasando del diario al mensual, con un ahorro del 92%.

# **Conclusiones**

## 7 Conclusiones

A la vista de todo lo expuesto y explicado en este trabajo, las conclusiones son las siguientes:

- Para que la reducción del Cr (VI) al Cr (III) tenga lugar el pH ideal se encuentra a un pH ácido, igual o inferior a 1.5.
- La cantidad de lana de hierro óptima para que la reacción tenga lugar en el menor tiempo posible es de entre 1.5 y 5 g.
- La lana de hierro obtiene mejores resultados que la viruta debido a su área superficial y su baja densidad. Para obtener los mismos resultados utilizando viruta de hierro, no son suficientes 1.5 gramos. Habría que utilizar más cantidad de viruta o bajar el pH.
- A la hora de utilizar lana de hierro para reducir agua residual real de empresa, la cantidad de lana óptima para reducir en el menor tiempo posible es de 2.5. Sin embargo, la mejor opción, ya que solo difiere en 5 minutos, es de 1 gramo.
- Utilizando 1 gramos de viruta de hierro, a pesar de la diferencia de forma y área superficial de esta, los 3 experimentos coinciden que la reacción se lleva a cabo en un total de 1 hora.
- La elección a nivel industria entre la lana y la viruta de hierro dependerá de la disponibilidad entre una y otra. La mejor opción para las empresas del entorno automovilístico es la viruta de hierro ya que es un residuo muy barato y suele estar cerca de este tipo de empresas si no en la misma reduciendo de esta forma el precio de transporte.
- El proceso más rentable resulta al tratar el residuo una vez al mes utilizando como material reductor viruta de hierro, lo que determina que el proceso de reducción a gran escala utilizando viruta de hierro es viable.

# **Bibliografía**

## 8 Bibliografía

- AGP. (s.f.). *Catálogo Bombas AGP Sitoran*.
- Arango Ruiz, Á. (2005). La electrocoagulación: una alternativa para el tratamiento de aguas residuales. *Lasallista de Investigación*, 49-56.
- Arauzo, M., Rivera, M., Valladolid, M., Noreña, C., & Cedenilla, O. (2003). Contaminación por cromo en el agua intersticial, en el agua del cauce. *Limnética* 22 (3-4), 85-98.
- Arthanareeswaran, G., Thanikaivelan, P., Jaya, N., Mohan, D., & Raajenthiren, M. (2007). Removal of chromium from aqueous solution using cellulose acetate and. *Journal of Hazardous Materials*, 44-49.
- Barkat, M., Nibou, D., Chegrouche, S., & Mellah, A. (2009). Kinetics and thermodynamics studies of chromium(VI) ions adsorption onto activated carbon from aqueous solutions. *Chemical Engineering and Processing: Process Intensification*, 38-47.
- Beyersmann, D., & Hartwig, A. (2008). Carcinogenic metal compounds: recent insight into molecular and cellular mechanisms. *ARCHIVES OF TOXICOLOGY*, 493-512.
- BOE. (7 de Diciembre de 1961). *Boletín Oficial del Estado (BOE) núm. 292, páginas 17259 a 17271 Sección I. Disposiciones generales*.
- Cervantes, C., Campos-García, J., Devars, S., Gutiérrez-Corona, F., Loza-Tavera, H., Torres-Guzmán, J., & Moreno-Sánchez, R. (2001). Interactions of chromium with microorganisms and plants. *FEMS MICROBIOLOGY REVIEWS*, 335-347.
- Chávez Porras, Á. (2010). Descripción de la nocividad del cromo proveniente de la industria curtiembre y de las posibles formas de removerlo. *Ingenierías Universidad de Medellín*, 9(17), 41-49.
- Díaz, A., Chingaté, N., Muñoz, D., Olaya, W., Perilla, C., Sánchez, F., & Sánchez, K. (2009). Desarrollo sostenible y el agua como derecho en Colombia. *Estudios Socio-Jurídicos*, vol. 11.

DOUE. (18 de Abril de 2013). *Diario Oficial de la Unión Europea*, Núm. 108, páginas 1 a 5. Obtenido de <https://www.boe.es/buscar/doc.php?id=DOUE-L-2013-80742>

Durán-Álvarez, J. C., Avella, E., & Zanella, R. (2015). Descontaminación de agua utilizando nanomateriales y procesos fotocatalíticos. *Mundo nano. Revista interdisciplinaria en nanociencias y nanotecnología*, 17-39.

Electrobombas. (s.f.). *Electrobombas*. Obtenido de <https://www.electrobombas.es/bombas-centrifugas-550101?order=product.price.asc>

ENDESA. (2022). Obtenido de [https://www.endesaluzygaz.com/luz?utm\\_campaign=0101020114](https://www.endesaluzygaz.com/luz?utm_campaign=0101020114)

Envirotecnicos. (s.f.). *Envirotecnicos*. Obtenido de <https://www.envirotecnicos.com/producto/hierro-cero-valente-zvi/#funcionamiento>

Erol, P., & Türkan, A. (2008). Biosorption of chromium(VI) ion from aqueous solutions using walnut, hazelnut and almond shell. *Journal of Hazardous Materials*, 378-384.

Frocán, E. n. (s.f.). *Electro níquel Frocán*. Obtenido de <https://electroniquelforcan.com/cromado-de-metales/>

Gunnar, N. (2017). Metales: propiedades químicas y toxicidad. En *Enciclopedia de salud y seguridad e el trabajo* (pág. 63). Chantal Dufresne, BA.

Insst. (2017). *Insst*. Obtenido de <https://www.insst.es/stp/basequim/023-tratamientos-de-superficies-cromado-electrolitico-manual-exposicion-a-cromo-hexavalente-2017>

Katz, S. A., & Salem, H. (1994). *The Biological and Environmental Chemistry of Chromium*. John Wiley & Sons Inc.

Lenntech. (s.f.). *Lenntech*. Obtenido de <https://www.lenntech.es/periodica/elementos/cr.htm>

- Lima, J. (s.f.). Uso de hierro cero valente para la remoción de cromo 6 en suelos contaminados. *Relabsa*.
- Martínez, E. R. (2015). Remoción de Cromo (VI) por una cepa de *Aspergillus niger* resistente a cromato. *Información tecnológica*, 13-20.
- Pájaro, Y., & Díaz, F. (2012). REMOCIÓN DE CROMO HEXAVALENTE DE AGUAS CONTAMINADAS. *REVISTA COLOMBIANA DE QUÍMICA*, 283-298.
- PTR-España*. (s.f.). Obtenido de <https://prtr-es.es/Cr-Cromo-y-compuestos,15606,11,2007.html>
- Quijada Tomás, C. (2022). Apuntes de la asignatura de Química medioambiental, cuarto curso IQ.
- Quipu. (s.f.). *Quipu*. Obtenido de <https://getquipu.com/blog/cuanto-cuesta-contratar-un-trabajador/#:~:text=Habitualmente%20se%20suele%20decir%20que,de%2019.500%20%E2%82%AC%20al%20a%C3%B1o>.
- Ramirez-Diaz, M., Diaz-Perez, C., Vargas, E., Riveros-Rosas, H., Campos-Garcia, J., & Cervantes, C. (2008). Mechanisms of bacterial resistance to chromium compounds. *Biometals*, 321-332.
- rendiciondecuentas. (s.f.). *rendiciondecuentas.es*. Obtenido de <https://www.rendiciondecuentas.es/es/informaciongeneral/gastosentidad/GastosInversion.html#:~:text=Los%20gastos%20de%20inversi%C3%B3n%20de,o%20permanencia%20a%20largo%20plazo>.
- Sánchez, A. D. (s.f.). *economipedia*. Obtenido de <https://economipedia.com/definiciones/gastos-de-explotacion.html#:~:text=Los%20gastos%20de%20explotaci%C3%B3n%20o,la%20actividad%20de%20la%20empresa>.
- Santos-Juanes, L., Vicente, R., & Sciscenko, I. (2021). Apuntes asignatura Tecnología de Bioprocesos, tercer curso IQ.
- Sarabjeet S. A., D. G. (2007). Microbial and plant derived biomass for removal of heavy metals from wastewater. *Bioresource Technology*, 2243-2257.



- Shiklomanov, I. A., & Rodda, J. C. (2003). World water resources at the beginning of the twenty-first century. *The press syndicate of the University of Cambridge*.
- Tapia, J., Freer, J., Mansilla, H., Villaseñor, J., Bruhn, C., & Basualto, S. (2002). ESTUDIO DE REDUCCIÓN FOTOCATALIZADA. *Boletín de la Sociedad Chilena de Química*.
- Torregrosa, J. I. (2021). Apuntes asignatura de Tecnología, de tercer curso, IQ.
- Varios. (1984). Enciclopedia de Ciencia y Técnica. Salvat Editores S. A.
- Via, I. (2022). *Catálogo*.
- Zayed, A. M., & Terry, T. (2003). Chromium in the environment: factors affecting biological remediation. *Plant and soil*, 139-156.