

EVALUACIÓN DE LA OBTENCIÓN DE CARBÓN ACTIVADO A PARTIR LODOS DE DEPURADORAS DE AGUAS RESIDUALES DE LA COMUNIDAD DE VALENCIA: REVISIÓN BIBLIOGRÁFICA

HERALDO MANUEL BETANCOURT ROMERO*
<https://orcid.org/0000-0001-8407-0222>

BYRON GONZALO LAPO CALDERÓN
<https://orcid.org/0000-0002-8556-1442>

JOSÉ HUMBERTO AYALA ARMIJOS
<https://orcid.org/0000-0003-0148-4433>

Universidad Técnica de Machala, Ecuador

Recibido: 1 de agosto del 2022 / Aceptado: 28 de septiembre del 2022

doi: <https://doi.org/10.26439/ing.ind2022.n43.5959>

RESUMEN. El crecimiento poblacional es un indicador de que la producción de lodos de depuradoras va a seguir incrementándose en los próximos años como consecuencia del incremento del número de plantas de tratamiento de aguas residuales. Este trabajo analiza los estudios que se han realizado en los últimos años sobre la utilización de lodos de depuradora para la obtención de carbón activado (CA). Los resultados indicaron que en el 2013 hubo una mayor producción científica (13,86 %) con respecto a los otros años y el país que destaca en investigaciones es China (52,48 %). Se encontró que el 77,23 % de estudios usó como única materia prima lodo de depuradora y el 22,77 % empleó lodos de depuradora más otro precursor para mejorar el rendimiento de adsorción de los carbones activados obtenidos. Se indicaron eficiencias de remoción ≥ 50 % en colorantes, compuestos orgánicos, compuestos químicos y metales pesados (63,6 %, 68,2 %, 71,4 % y 60,6 % respectivamente); a su vez, los fármacos tuvieron un mayor porcentaje (66,7 %) en eficiencia de remoción < 50 %. En conclusión, hay mucho interés en la valorización de los lodos de depuradora, de los que se puede obtener un producto de valor agregado. Los resultados demuestran altos rendimientos de remoción de contaminantes, lo que hace que esta alternativa sea económicamente viable.

PALABRAS CLAVE: lodos / depuradoras / metales pesados / adsorción / contaminantes / carbón activado

* Correos electrónicos en orden de aparición: heraldbetan@gmail.com; blapo@utmachala.edu.ec; jayala@utmachala.edu.ec

EVALUATION OF OBTAINING ACTIVATED CARBON FROM WASTEWATER TREATMENT PLANT SLUDGE IN THE COMMUNITY OF VALENCIA: A REVIEW

ABSTRACT. As the population grows, sewage sludge production will continue to increase due to necessary increase in the number of wastewater treatment plants. This work analyzes studies from recent years on the use of sewage sludge to obtain activated carbon (AC). The results indicate that in 2013 there was a greater scientific production (13,86 %) compared to other years and the country that stands out in the research is China (52,48 %). They also show that 77,23 % of the studies used sewage sludge as the only raw material, and 22,77 % used sewage sludge plus another precursor to improve the adsorption performance of the activated carbons. Removal efficiencies ≥ 50 % were indicated in dyes, organic compounds, chemical compounds and heavy metals (63,6 %, 68,2 %, 71,4 %, 60,6 % respectively), in turn, drugs had a higher percentage (66,7 %) in removal efficiencies < 50 %. In conclusion, there is much interest in recovering sewage sludge, which allows for obtaining a value-added product. The results show high contaminant removal performance, which makes this alternative economically viable.

KEYWORDS: Sludge / treatment plants / heavy metals / adsorption / pollutants / activated carbon

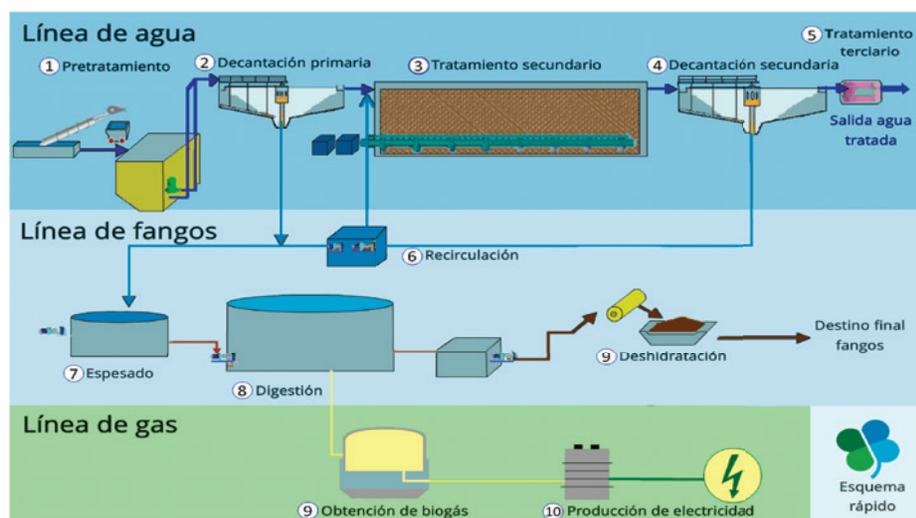
1. INTRODUCCIÓN

1.1 Fangos / lodos de depuradora

Los lodos de depuradora se definen según la Directiva sobre aguas residuales de la UE 86/278/CEE como “los lodos residuales provenientes de las plantas de tratamiento de aguas residuales domésticas o urbanas y de otras plantas de tratamiento de aguas residuales de una composición similar a las aguas residuales domésticas y urbanas” (Kurt et al., 2018), siendo esta agua de origen doméstico o mezclas de aguas residuales domésticas con aguas residuales industriales y/o agua de correntía pluvial. Una EDAR está encargada de reducir la contaminación de las aguas residuales mediante ciertos tratamientos y procesos, pero además tiene otro objetivo, tratar los lodos producidos en los procesos de depuración del agua residual a fin de conseguir un producto que cumpla con las condiciones exigidas para el tratamiento o destino que se les vaya a dar (González, 2016; Pérez, 2016; Jiménez, 2018). Del proceso depurativo del agua residual se obtienen dos corrientes fundamentalmente: una es el agua ya tratada, que se envía a un cauce receptor con la certeza de que no producirá contaminación alguna, y la otra es la llamada de lodos de depuradora. Estos son residuos semisólidos resultantes de los diferentes procesos de tratamiento químicos, biológicos y físicos (Figura 1). Los lodos no se pueden eliminar directamente sin aplicarles otro tipo de tratamiento, ya que contienen gran cantidad de sustancias patógenas para el ambiente y el hombre (Pérez, 2016; Vila, 2018; Jiménez, 2018).

Figura 1

Esquema del proceso de una EDAR



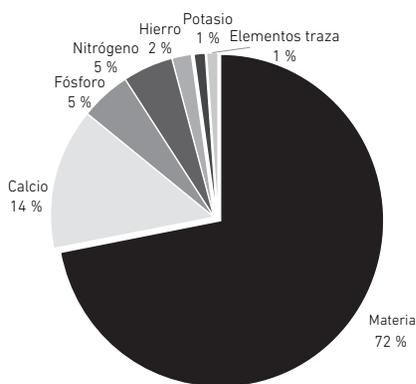
Nota. Adaptado de “Valoración de fangos de EDAR vía digestión y cogeneración del biogás,” por M. Jiménez, 2018, p.25. <http://uvadoc.uva.es/handle/10324/31341>

Es importante tener en cuenta el tipo de tratamiento presente en la línea de agua y de la eficiencia del mismo. Por ello, no solo hay que tener en cuenta los procesos en los que se generan los lodos (tratamientos primarios, biológico y/o químico), sino el buen funcionamiento de los procesos anteriores porque van a influir en la cantidad de lodos obtenidos (González, 2016).

Los lodos se caracterizan por ser un residuo extremadamente líquido (con más de un 95 % de agua). La composición y cantidad generada de lodos puede variar considerablemente de una instalación de tratamiento a otra dependiendo de factores como el tipo de contaminantes presentes, los hábitos de una población, el clima, tipo de tratamiento realizado tanto al agua como al fango, caudal, número de habitantes abastecidos, etc. Los tratamientos del agua concentran la contaminación presente en el agua y, por tanto, los lodos contienen amplia diversidad de materias suspendidas o disueltas. Algunas de ellas con valor agronómico (materia orgánica, nitrógeno, fósforo y potasio, y en menor cantidad calcio, magnesio y otros micronutrientes esenciales para las plantas) y otras con potencial contaminante como los metales pesados (entre ellos: cadmio, cromo, cobre, mercurio, níquel, plomo y zinc), los patógenos y los contaminantes orgánicos (Figura 2) (Jiménez, 2018).

Figura 2

Composición típica de la materia seca de los lodos de EDAR



Nota. Adaptado de "Greenhouse gas mitigation potentials in the livestock sector" por M. Herrero et al., 2016, *Nature Climate Change*, 6. <https://www.nature.com/articles/nclimate2925>

Teniendo en cuenta la información de la Entidad Pública de Saneamiento de Aguas Residuales de la Comunidad Valenciana (EPSAR) referente a la aplicación de lodos en la Comunidad Valenciana, los lodos de depuradora son residuos semisólidos en los que predomina el agua (72-85 %) y en menor proporción residuo seco (28-15 %). Se entiende como residuo seco la amplia cantidad de materia disuelta o suspendida que podemos

encontrar en los lodos. La composición principal del residuo seco del lodo es materia orgánica, básicamente, biomasa microbiana (Pérez, 2016).

1.2 Clasificación de los lodos de depuradora

Existen diversos criterios que permiten clasificar los lodos, entre ellos:

- a. Origen del efluente de la EDAR
- b. Etapa de depuración de las aguas residuales en la que se genere el lodo
- c. Tipo de tratamiento específico realizado en la línea de fangos (Wang et al., 2008)

1.2.1 Origen del efluente de la EDAR

- Lodos urbanos: el agua tratada en la EDAR tiene un componente predominantemente urbano (el porcentaje de agua urbana es ≥ 80 %). La cuenca de recogida de aguas está formada por aguas domésticas y de pequeñas y medianas empresas ubicadas dentro de los cascos urbanos.
- Lodos industriales: son los lodos generados en estaciones de tratamiento de vertidos industriales o con una predominancia de estos.

La calidad de las aguas influentes a la EDAR determinará los posibles riesgos de presencia de contaminación no biodegradable, que puede deteriorar las características de los lodos, de forma que su destino final se vea condicionado (González, 2016).

1.3 Carbón activado

El carbón activado o carbón activo (CA) es un material carbonoso, microcristalino y no grafitico, preparado por carbonización de materiales orgánicos, que se ha sometido a un proceso de activación con gases oxidantes o bien a un tratamiento con adición de productos químicos con el objeto de aumentar su porosidad y desarrollar su superficie interna, lo que confiere a los carbones activados una alta capacidad adsorbente (Boualem et al., 2014). Dicha propiedad de retener moléculas en su estructura se denomina adsorción; al sólido se le designa como *adsorbente* y a la sustancia adsorbida, *adsorbato* (Templeton y Collins, 2016). Las propiedades adsorbentes del CA se atribuyen a su extensa área superficial, a su alto grado de reactividad superficial, a una fuerza o resistencia mecánica adecuada, al volumen de poros que varía entre 0,1 y 2,0 $\text{cm}^3 \text{g}^{-1}$, y a su tamaño de poro adecuado que permite la accesibilidad a la superficie interna. El área superficial de los carbones activos comerciales (CAC) suele estar comprendida entre 400 y 2000 $\text{m}^2 \text{g}^{-1}$ y está contenida principalmente en los poros de menor tamaño. La estructura porosa de un CA se debe a diversas razones: el material de partida, el proceso de activación y la extensión en que se ha realizado este último. Esta es la razón por la que el área superficial y el volumen de poros de

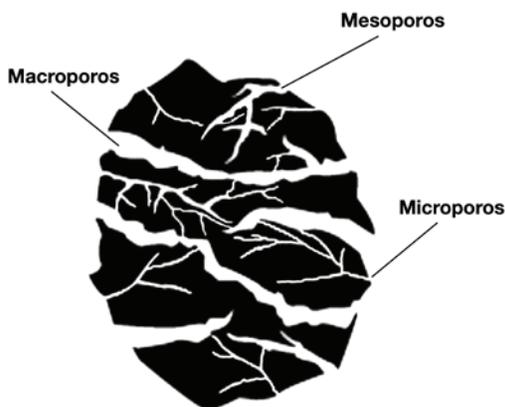
los carbones activos puede variar tanto de unos carbones a otros. La aplicabilidad de un determinado CA para uno u otro uso radica en la relación de poros de diferentes tamaños. Así, los poros de menor tamaño son adecuados para la adsorción de gases y vapores y también para la separación de adsorbatos, mientras que en el caso de adsorción de solutos en disoluciones acuosas son preferibles poros de tamaños mayores (Ovín, 2011).

Los carbones activados son materiales macroscópicamente desordenados, aunque poseen dominios microcristalinos con un cierto grado de ordenamiento. El proceso de activación al que se someten los carbones activados implica la desaparición de carbono de los espacios situados entre las formaciones cristalográficas compuestas de carbono no organizado, lo que hace que se forme una gran cantidad de pequeños espacios entre las partículas, que se denominan poros, lo que produce que estos materiales posean una gran superficie interna en comparación con la superficie externa o geométrica. Esta estructura porosa interna, tan desarrollada y accesible a los procesos de adsorción, confiere a los carbones activados su principal característica: su gran capacidad adsorbente. De acuerdo con la clasificación de la International Union of Pure and Applied Chemistry (IUPAC), los poros se clasifican en función de su diámetro en tres grupos principales, como se muestra en la Figura 3:

- Microporos: diámetro de poro menor de 2 nm
- Mesoporos: diámetro de poro entre 2 nm y 50 nm
- Macroporos: diámetro de poro mayor de 50 nm

Figura 3

Gránulo de carbón activado (CA)



Nota. Adaptado de "Activated carbons obtained from sewage sludge by chemical activation: Gas-phase environmental applications," por T. Boualem et al, 2014, *Journal of Environmental Management*, 140. <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0301479714001510>

Aunque los principales responsables de la adsorción en un CA son los microporos, ya que son los que contribuyen en mayor medida a la superficie específica del carbón, los mesoporos y macroporos son igualmente importantes, ya que facilitan el acceso de los adsorbatos a los microporos. Las propiedades adsorbentes de los CA no se ven solo determinadas por su estructura porosa, sino también por su naturaleza química, ya que contienen en su estructura pequeñas cantidades de heteroátomos tales como oxígeno y nitrógeno, lo que permite que sustancias polares sean débilmente retenidas sobre la superficie del CA (Boualem et al., 2014).

2. METODOLOGÍA

En este estudio se consultaron artículos científicos de dos bases de datos: Science Direct y Scopus. Se consideró solo artículos publicados en revistas científicas desde el 2010 hasta la actualidad y se encontró un total de 101 publicaciones durante dicho periodo. Para la obtención de los artículos se han utilizado las siguientes palabras clave o conjuntos de palabras: *sewage sludge, activated carbon, carbonization, solid waste, residual water treatment, organic waste, valorization*.

Después de la recolección del material de estudio, la revisión se desarrolló con el fin de contextualizar el proceso de obtención de carbón activado a partir de lodos de depuradoras; finalmente, se presentan los análisis de costo-beneficio como un método para integrar todos los costos y beneficios que un proyecto de gestión tiene sobre la dimensión económica, social y ambiental de una sociedad.

3. RESULTADOS Y DISCUSIONES

3.1 Valorización de los lodos de depuradora

Una opción que presenta una promesa especial debido a su potencial para valorizar los lodos de depuradora es la conversión de los mismos en adsorbentes, especialmente el carbón activado (Wang et al., 2011). Se informó que los carbones activados producidos a partir de materiales de desecho de bajo costo tienen eficiencias de remoción de contaminantes que son similares a los producidos por carbones activados comerciales (Al-Malack y Dauda, 2018). La producción de CA a partir de lodos tiene el potencial de ser una alternativa rentable con respecto a la gestión de residuos. De hecho, los costos de producción de carbón a base de lodos dependen de factores como la disponibilidad de lodos y el procesamiento requerido, incluidos los costos de energía para la pirólisis y el secado, y tienen el potencial de estar a la par o incluso más bajos que los costos de producción de los carbones activados comerciales (Björklund y Li, 2017b). El CA se usa ampliamente en la descontaminación del aire y de las aguas residuales. Su efectividad

para remover contaminantes se ha encontrado superior a muchos otros métodos debido a la alta calidad del efluente obtenido, la simplicidad de diseño, la facilidad de operación y la insensibilidad a las sustancias tóxicas (Almahbashi et al., 2021; He et al., 2022; Huang et al., 2022). En los últimos años, varios países se han dedicado al estudio de la obtención de carbón activado a partir de lodos de depuradora (CALD) como se muestra a continuación:

Figura 4

Artículos publicados en los últimos años sobre la obtención de CALD

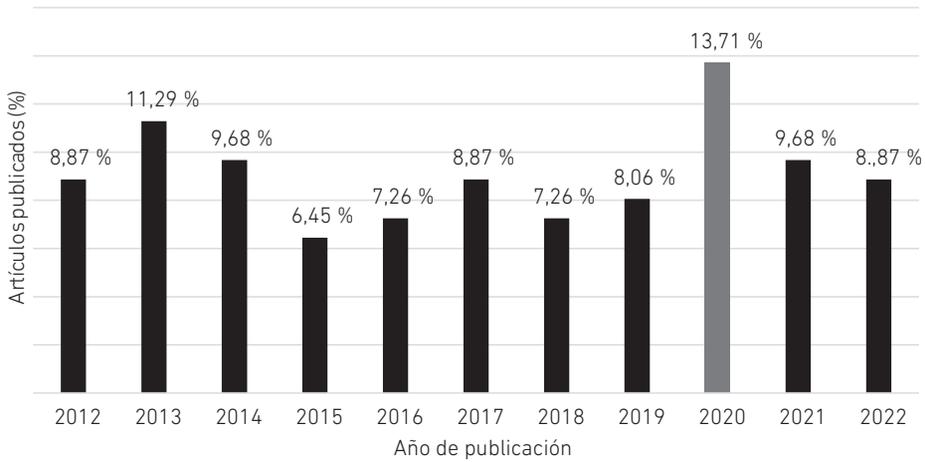
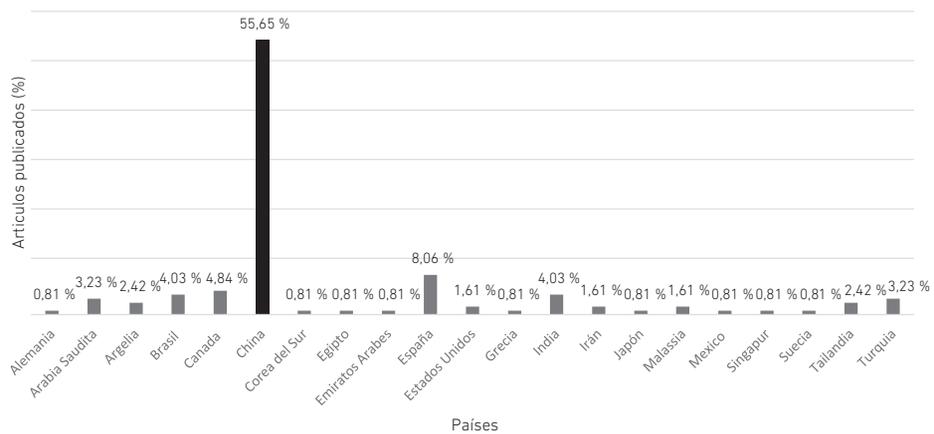


Figura 5

Países que han investigado sobre la obtención de CALD, periodo 2012 - 2022



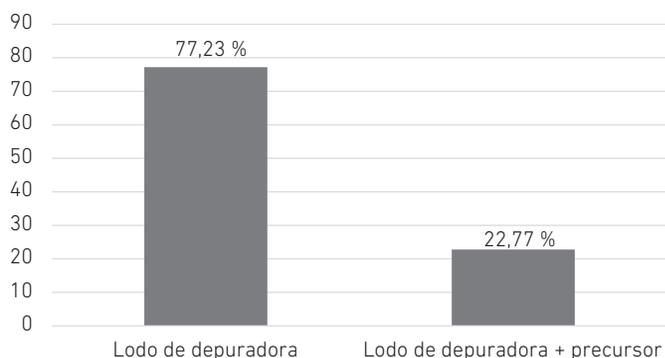
Se puede observar, en la Figura 4, que en el año 2020 se encontró un mayor porcentaje de publicaciones (13,71 %) con respecto a los otros años. Por otro lado, en la distribución de publicaciones en función de los países destaca China (55,65 %) en el periodo 2012-2022 como se muestra en la Figura 5.

3.2 Desarrollo en la obtención de carbón activado a partir de lodos de depuradora

Actualmente, los principales métodos utilizados para la obtención de carbón activado son físicos y químicos o una combinación de ambos; el más empleado es pirólisis, seguido de la gasificación. En la activación física, los gases de activación, como el dióxido de carbono, el aire o el vapor de agua, se utilizan para corroer la superficie de la matriz de carbono a altas temperaturas (Filippín et al., 2017). Los procesos de activación química son maduros e involucran el uso de metales alcalinos, ácidos y sales, por ejemplo, el hidróxido de potasio (KOH) (Yang et al., 2019). El KOH es un activador muy utilizado debido a su rendimiento de activación altamente efectivo, el ácido fosfórico (H_3PO_4) y el cloruro de zinc ($ZnCl_2$) también son utilizados pero debido a su alto costo, siempre quedan como segunda opción. Se ha demostrado que el uso de un agente activador y la temperatura de carbonización fueron los factores clave que influyeron en la calidad de los adsorbentes basados en lodos. Los investigadores sugieren que la optimización de la temperatura de carbonización de lodos con materia orgánica adecuada podría mejorar el rendimiento de adsorción de los carbones activados obtenidos (Zhao et al., 2017). Por ejemplo, a mayor temperatura de pirólisis, la microporosidad y el área de superficie de CALD aumenta, lo cual beneficia la estructura del material adsorbente (Zhou et al., 2019). A continuación, se describe la proporción de artículos científicos que utilizaron como materia prima principal lodos de depuradora, frente a estudios que incluyeron lodos de depuradora + precursor.

Figura 6

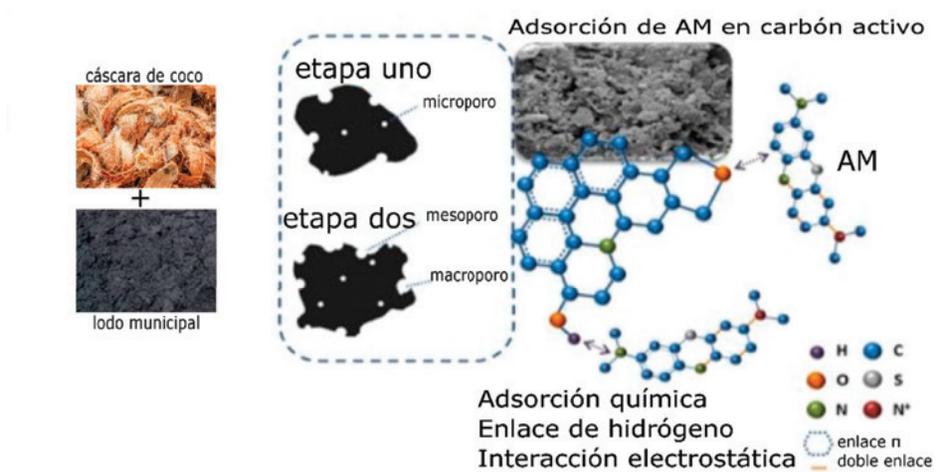
Distribución porcentual de estudios publicados que han utilizado lodos de depuradora y lodos de depuradora + materia orgánica



Según describe la Figura 6, se encontró un mayor porcentaje de publicaciones donde se aplicó el lodo de depuradora como única materia prima para obtener el carbón activado (77,23 %); cabe mencionar que el 22,77 % de artículos en los que se aborda el empleo de lodos de depuradora + precursor son recientes, por lo cual se espera que estos estudios aumenten e incluso superen a los que emplean un solo precursor para obtener carbón activado. El desarrollo de estos estudios hace que estas técnicas sean novedosas, eficientes y respetuosas con el medio ambiente debido a que se utiliza en conjunto con los lodos de depuradora, otra materia prima para obtener carbón activado. Se muestran algunos estudios recientes en las figuras 7 y 8.

Figura 7

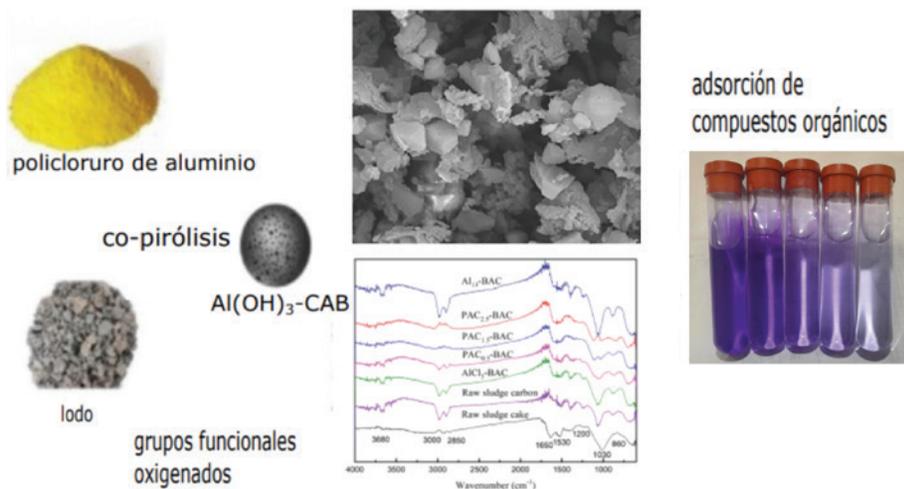
Evaluación de carbón activado sintetizado por co-pirólisis en una y dos etapas a partir de lodos y cáscara de coco



Nota. Se entiende por AM: azul de metileno. Adaptado de "Evaluation of activated carbon synthesized by one-stage and two-stage co-pyrolysis from sludge and coconut shell" por B. Yang et al., 2019, *Ecotoxicology and Environmental Safety*, 170. <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0147651318312739>

Figura 8

Preparación de carbón biológico activado (CBA) utilizando sales de aluminio acondicionadas con torta de lodo



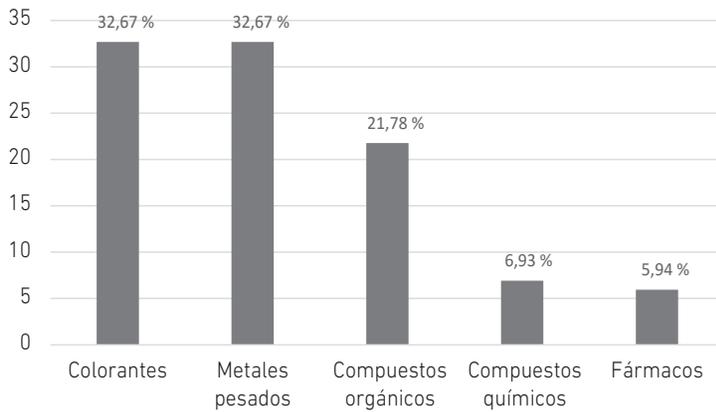
Nota. Adaptado de "Preparation of biological activated carbon (BAC) using aluminum salts conditioned sludge cake for the bio-refractory organic contaminants removal from anaerobically digested liquor" por H. Cheng et al., 2019, *Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects*, 561, p.89. <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S092777571830801X>

3.3 Análisis de los resultados alcanzados en las investigaciones

El manejo de los lodos de desecho continúa planteando un gran desafío, dado el creciente desarrollo del tratamiento de aguas residuales. Se indicó que debido a los componentes complejos en los lodos, se podrían generar altos costos de remoción, los cuales serían más del 60 % del costo operativo del proceso total de tratamiento de aguas residuales (Cheng et al., 2019). Los CALD son conocidos por ser adsorbentes con rendimientos altos en la remoción de contaminantes en el tratamiento de aguas residuales. Los estudios demostraron que tienen excelentes propiedades de adsorción y son aplicables para la remoción de antibióticos (Rivera-Utrilla et al., 2013; Xu et al., 2015), varios tipos de colorantes (Kacan, 2016; Puchana-Rosero et al., 2016; Silva et al., 2016), contaminantes orgánicos (Björklund y Li, 2017a; Li et al., 2011) y muchos metales pesados como Cd, Cr, Cu, Ni, Pb, Zn y Hg (Zhou et al., 2019). Se describe a continuación la proporción de artículos científicos encontrados que incluyeron estos tipos de contaminantes para ser objeto de remoción experimental, mediante adsorción con CALD.

Figura 9

Tipos de contaminantes utilizados en los estudios de adsorción de CALD



En la Figura 9, los tipos de contaminantes más estudiados fueron, en una misma proporción, los colorantes y los metales pesados con el (32,67 %), esto es debido a que hoy en día es imprescindible someter las aguas residuales a tratamientos adicionales (por ejemplo, con carbón activado) antes de ser vertidas al medio ambiente. Por otro lado, la presencia de residuos farmacéuticos en las aguas residuales ha cobrado mucho interés en los últimos años, sin embargo, se encontró tan solo un (5,94 %) de estudios dedicados a estos contaminantes, lo que podría indicar que faltaría investigar aún más su remoción mediante adsorción con CALD. Se realizó un análisis de los resultados obtenidos en las investigaciones acerca de la adsorción del carbón activado a partir de lodos de depuradora (CALD) elaborados y se los agrupó en dos categorías, de acuerdo con su eficiencia de remoción (<50 % y \geq 50 %), ya que en mayoría de los estudios se presentaban rangos de remoción de los distintos contaminantes.

Tabla 1

Análisis de los resultados obtenidos en las publicaciones sobre eficiencia de remoción por adsorción del CALD elaborado

| Tipo de compuesto y/o contaminante | | Recuento de publicaciones | Eficiencia de remoción por adsorción del CALD | | Total de publicaciones |
|------------------------------------|---|---------------------------|---|-------|------------------------|
| | | | 50 % | 50 % | |
| Colorantes | | 12 | 21 | 33 | |
| | % | 36,4 % | 63,6 % | 100 % | |
| Compuestos orgánicos | | 7 | 15 | 22 | |
| | % | 31,8 % | 68,2 % | 100 % | |
| Compuestos químicos | | 2 | 5 | 7 | |
| | % | 28,6 % | 71,4 % | 100 % | |
| Fármacos | | 4 | 2 | 6 | |
| | % | 66,7 % | 33,3 % | 100 % | |
| Metales pesados | | 13 | 20 | 33 | |
| | % | 39,4 % | 60,6 % | 100 % | |
| | | | | | 101 |

Según el análisis de la Tabla 1, los estudios que demuestran eficiencias de remoción ≥ 50 % fueron aquellos dedicados a los colorantes, los compuestos orgánicos, los compuestos químicos y los metales pesados (63,6 %, 68,2 %, 71,4 %, 60,6 %) respectivamente; a su vez, los fármacos tuvieron un mayor porcentaje (66,7 %) en eficiencias de remoción < 50 %. Se ha comentado anteriormente que algunos de ellos han sido más estudiados, por lo cual se puede entender que han mejorado los parámetros experimentales y así se han obtenido buenos resultados de remoción de estos contaminantes.

3.4 Estudio de viabilidad para la remoción de productos farmacéuticos presentes en las aguas residuales con CALD

Actualmente existen muchos estudios cuyo objetivo es identificar productos farmacéuticos (PF) específicos en muestras de aguas residuales, sus concentraciones y diferentes opciones de tratamiento para su remoción. Una forma de reducir los niveles de PF en

efluentes es a través de tecnologías de tratamiento terciario, si bien es importante tener en cuenta que este proceso aumenta el costo del tratamiento de las aguas residuales. Sin embargo, no todas las EDAR incorporan este tipo de tecnologías. Por ejemplo, en España solo el 9 % de las aguas residuales urbanas recibe tratamiento terciario. Esta situación hace que la presencia de PF en los efluentes de las EDAR sea relevante para los fines de reutilización del agua. En este sentido, se ha evaluado la eficacia de eliminar los PF mediante diferentes procesos (por ejemplo, mediante carbón activado). Por lo tanto, es necesario cuantificar los costos generales de los procesos de tratamiento de aguas residuales (incluidas las mejoras tecnológicas en las EDAR) para seleccionar la tecnología adecuada para eliminarlos (Bellver-Domingo et al., 2017).

El análisis costo-beneficio (ACB) se presenta como un método ampliamente aceptado y usado para evaluar la viabilidad económica de proyectos y actuaciones (Hernández et al., 2010). La tendencia actual de la economía en relación con el medio ambiente es incluir las externalidades ambientales en el análisis de viabilidad. Los precios sombra podrían utilizarse para internalizar las externalidades ambientales relacionadas con los productos farmacéuticos, que ingresan con facilidad en los cuerpos de agua y representan una amenaza para el equilibrio del ecosistema, por lo que resulta importante su incorporación a los procesos de toma de decisiones y una evaluación adecuada de los costos generales (Morfil, 2021). En este trabajo, se ha considerado realizar un estudio de viabilidad económica suponiendo que una EDAR deseara instalar un tratamiento terciario para la remoción de productos farmacéuticos en sus efluentes de descarga para mejorar la calidad del agua con miras a su reutilización. Se plantea que la tecnología más adecuada para este propósito es mediante adsorción con carbón activado, el mismo que será elaborado mediante otra tecnología a partir de los CALD que se producen diariamente en la misma instalación. Los datos generales de la EDAR e hipótesis económicas de la inversión a realizar se encuentran en la Tabla 2.

Tabla 2

Hipótesis económicas para el estudio de viabilidad simulado

| Hipótesis económicas | | |
|---|------------|---------|
| Datos generales de la EDAR | | |
| Habitantes equivalentes | 200 000 | HE |
| Caudal tratado | 31,595 | M3/día |
| Lodo producido | 12 | TMS/día |
| Tecnología A - elaboración de CALD | | |
| Costo de inversión | € 2331,565 | |
| Costos de operación y mantenimiento | 52 | €/ton |
| Periodo de amortización | 20 | años |
| Tecnología B - tratamiento terciario con CALD | | |

(continúa)

(continuación)

| | | |
|-------------------------------------|------------|------------------|
| Costo de inversión | € 6254,565 | |
| Costos de operación y mantenimiento | 0,152 | €/m ³ |
| Precio de venta del agua | 0,355 | €/m ³ |
| Periodo de amortización | 20 | años |
| Beneficio ambiental | 17 538 | M€/año |
| Inflación | 3 | % |
| Tasa de descuento | 3 | % |
| Tipo de interés | 2 | % |

El periodo de amortización de ambas tecnologías es de 20 años, la inflación es del 3 %, la tasa de descuento es del 3 % y el tipo de interés del 2 %. El precio de venta del agua regenerada se estima en 0,355 €/m³. Según el estudio de (Bellver-Domingo et al., 2017), el beneficio ambiental de eliminar ibuprofeno, carbamazepina, trimetoprim, acetaminofén y naproxeno de los efluentes que se descargan de las EDAR con destino a humedal, río y mar, se estima en un promedio de 17 538 M€/año. Su cifra elevada es debido a que algunos de estos PF han sido detectados en grandes concentraciones en estos ecosistemas acuáticos. Para conseguir un ACB realista, las externalidades ambientales han sido incluidas en este ejemplo. Se calcula a continuación el valor de esos costos y beneficios en el futuro (considerando la vida útil del proyecto), además del valor actual neto (VAN) de esos flujos de caja, de tal forma que esos costos y beneficios proyectados a futuro los traemos al presente.

Tabla 3*Flujos de caja y cálculo del valor actual neto (VAN) en euros (€)*

| Año | Beneficio total - costo total (con externalidades) | Beneficio total - costo total (sin externalidades) | VAN (con externalidades) | VAN (sin externalidades) |
|-----|--|--|--------------------------|--------------------------|
| 1 | 17 799 078,762 | 1708,762 | 17 450 077,217 | 1675,257 |
| 2 | 18 333 031,125 | 1740,025 | 17 621 137,183 | 1672,458 |
| 3 | 18 883 001,590 | 1771,757 | 17 793 874,142 | 1669,566 |
| 4 | 19 449 470,693 | 1803,965 | 17 968 304,539 | 1666,585 |
| 5 | 20 032 933,387 | 1836,657 | 18 144 444,980 | 1663,517 |
| 6 | 20 633 899,470 | 1869,838 | 18 322 312,232 | 1660,363 |
| 7 | 21 252 894,039 | 1903,518 | 18 501 923,230 | 1657,127 |
| 8 | 21 890 457,939 | 1937,703 | 18 683 295,072 | 1653,810 |
| 9 | 22 547 148,243 | 1972,400 | 18 866 445,023 | 1650,416 |

(continúa)

(continuación)

| Año | Beneficio total - costo total (con externalidades) | Beneficio total - costo total (sin externalidades) | VAN (con externalidades) | VAN (sin externalidades) |
|-----|--|--|--------------------------|--------------------------|
| 10 | 23 223 538,736 | 2007,618 | 19 051 390,520 | 1646,946 |
| 11 | 23 920 220,416 | 2043,364 | 19 238 149,168 | 1643,402 |
| 12 | 24 637 802,010 | 2079,646 | 19 426 738,746 | 1639,787 |
| 13 | 25 376 910,507 | 2116,473 | 19 617 177,208 | 1636,102 |
| 14 | 26 138 191,707 | 2153,852 | 19 809 482,683 | 1632,350 |
| 15 | 26 922 310,783 | 2191,791 | 20 003 673,477 | 1628,533 |
| 16 | 27 729 952,861 | 2230,300 | 20 199 768,076 | 1624,653 |
| 17 | 28 561 823,624 | 2269,386 | 20 397 785,148 | 1620,711 |
| 18 | 29 418 649,924 | 2309,059 | 20 597 743,543 | 1616,709 |
| 19 | 30 301 180,418 | 2349,327 | 20 799 662,296 | 1612,650 |
| 20 | 31 210 186,222 | 2390,198 | 21 003 560,629 | 1608,535 |
| | | | 383 496 945,112 | 32 879,478 |

Como se observa en la Tabla 3, el VAN obtenido es positivo, con externalidades ambientales y sin ellas, lo cual indica que los beneficios totales son superiores a los costos totales y que este proyecto es económicamente viable. Este ejemplo da una clara idea de una buena gestión integrada de los recursos hídricos que minimiza los impactos ambientales (contaminantes, lodos generados) y mejora la reutilización del agua tratada.

4. CONCLUSIONES

La gran producción mundial de lodos de depuradora seguirá incrementándose en los próximos años debido al aumento del número de plantas de tratamiento de aguas residuales en razón del crecimiento poblacional. Estos lodos son ricos en materia orgánica, por tal motivo se ha investigado en la obtención de adsorbentes de bajo costo. China destaca en estas investigaciones con el (52,48 %) de las publicaciones acerca de procesos en los que se ha obtenido carbón activado a partir de lodos de depuradora (CALD). La preparación de CALD está siendo objeto de estudio en la actualidad como adsorbentes para la remoción de diversos contaminantes presentes en las aguas residuales.

En la comunidad de Valencia se desarrollan carbones activados a partir de lodos de depuradora en nuevas condiciones experimentales, los cuales demuestran que el uso de un agente activador y la temperatura de carbonización fueron factores clave que influyeron en la calidad de los carbones activados. Los investigadores establecen

que los mismos tienen excelentes propiedades de adsorción y son aplicables para la remoción de fármacos, varios tipos de colorantes, contaminantes orgánicos y muchos metales pesados como Cd, Cr, Cu, Ni, Pb, Zn y Hg. Además, se encontró en un 22,77 % de publicaciones recientes que en estos procesos se emplean lodos de depuradora y otro precursor para obtener carbón activado, lo cual hace que esta alternativa sea respetuosa con el medio ambiente ya que se utiliza otro residuo para su elaboración.

La Directiva Marco del Agua (DMA) da un nuevo enfoque en la planificación de los recursos hídricos, ya que introduce el concepto de recuperación de costos de los servicios relacionados con el agua, junto con la necesidad de realizar estudios económicos para el diseño e implementación de políticas eficientes en la gestión de los recursos hídricos. Se demostró, mediante un ejemplo, la viabilidad económica de la remoción de productos farmacéuticos presentes en las aguas residuales por medio de un tratamiento terciario (adsorción con CALD), donde se obtuvo un VAN positivo con externalidades ambientales y sin ellas, lo cual indica que usar esta alternativa es económicamente viable. Además, debido a que el CALD obtenido tiene excelentes rendimientos de remoción de contaminantes, semejantes a los del carbón activado comercial (que tiene un rendimiento de remoción de 85 %, y un costo aproximado es de € 985/ton), se podría analizar incluso su venta.

La eliminación total del carbón activado saturado sigue siendo la opción más viable cuando el material adsorbente se encuentre totalmente saturado. El método más efectivo para su disposición final es la encapsulación en concreto, cal, plástico o asfalto ya que, de esta manera, se presenta una resistencia fuerte a la lixiviación.

El análisis coste beneficio (ACB) es una herramienta útil para integrar todos los costos y beneficios de un proyecto de gestión en relación con las dimensiones económica, social y ambiental de una sociedad. Quedó demostrado que se debe incluir dentro de un análisis de viabilidad las externalidades ambientales que carecen de valor de mercado, ya que tienen mucha influencia en la toma de decisiones para determinar si un proyecto es viable o no.

REFERENCIAS

- Al-Malack, M. H., & Dauda, M. (2018). Production of sludge-based activated carbon: Optimization and characterization. *Desalination and Water Treatment*, 123, 59-73.
- Almahbashi, N. M. Y., Kutty, S. R. M., Ayoub, M., Noor, A., Salihi, I. U., Al-Nini, A., Jagaba, A. H., Aldhawi, B. N. S., & Ghaleb, A. A. S. (2021). Optimization of preparation conditions of sewage sludge based activated carbon. *Ain Shams Engineering Journal*, 12(2), 1175-1182. <https://doi.org/10.1016/j.asej.2020.07.026>
- Bellver-Domingo, A., Fuentes, R., & Hernández-Sancho, F. (2017). Shadow prices of emerging pollutants in wastewater treatment plants: Quantification of

- environmental externalities. *Journal of Environmental Management*, 203(pt 1), 439-47. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2017.08.025>
- Björklund, K., & Li, L. (2017a). Removal of organic contaminants in bioretention medium amended with activated carbon from sewage sludge. *Environmental Science and Pollution Research*, 24(23), 19167-19180. <https://doi.org/10.1007/s11356-017-9508-1>
- Björklund, K., & Li, L. (2017b). Adsorption of organic stormwater pollutants onto activated carbon from sewage sludge. *Journal of Environmental Management*, 197, 490-97. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2017.04.011>
- Boualem, T., Debab, A., Martínez de Yuso, A., & Izquierdo, M. T. (2014). Activated carbons obtained from sewage sludge by chemical activation: Gas-phase environmental applications. *Journal of Environmental Management*, 140, 145-51. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2014.03.016>
- Cheng, H., Ai, J., Zhang, W., Fu, X., Du, Y., & Wang, D. (2019). Preparation of biological activated carbon (BAC) using aluminum salts conditioned sludge cake for the bio-refractory organic contaminants removal from anaerobically digested liquor. *Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects*, 561, 89-100. <https://doi.org/10.1016/j.colsurfa.2018.10.053>
- Dauda, M., & Al-Malack, M. H. (2018). Utilization of municipal sludge in adsorption of cadmium and phenol in Saudi Arabia. *Desalination and Water Treatment*, 113, 195-204.
- Fan, L., Chen, Y., Wang, L., & Jiang, W. (2011). Adsorption of Pb (II) ions from aqueous solutions by pyrolusite-modified activated carbon prepared from sewage sludge. *Adsorption Science and Technology*, 29(5), 495-506. <https://doi.org/10.1260/0263-6174.29.5.495>
- Fernández, A. (2010). *Tratamiento de aguas residuales mixtas para más de 100.000 habitantes equivalentes* [Tesis de grado]. UPCCommons. Portal de acceso abierto al conocimiento de la UPC. Universidad Politécnica de Cataluña. <http://hdl.handle.net/2099.1/10054>
- Filippín, A., Luna, N., Pozzi, M., & Pérez, J. (2017). Obtención y caracterización de carbón activado a partir de residuos olivícolas y oleícolas por activación física. *Avances en Ciencias e Ingeniería*, 8(3), 59-71. <https://www.redalyc.org/articulo.oa?id=323652916007>
- González Granados, I. C. (2016). *Generación, caracterización y tratamiento de lodos de EDAR* [Tesis doctoral]. Universidad de Córdoba. <http://hdl.handle.net/10396/13199>

- Herrero, M., Henderson, B., Havlík, P., Thornton, P., Conant, R., Smith, P., Wierseni, S., Hristov, A., Gerber, P., Gill, M., Butterbach, K., Valin, H., Garnett, T., & Stehfest, E. (2016). Greenhouse gas mitigation potentials in the livestock sector. *Nature Climate Change*, 6, 452-461. <https://doi.org/10.1038/nclimate2925>
- He, Y., Li, J., Zhao, Y., Yang, C., Xu, C., Liu, X., Xing, X., Tie, J., Li, R., & Zheng, J. (2022). Sewage-sludge derived activated carbon impregnated with polysulfide-sulfidated nZVI: A promising material for Cr(VI) reductive stabilization. *Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects*, 642, 128614. <https://doi.org/10.1016/j.colsurfa.2022.128614>
- Hernández Sancho, F., Molinos Senante, M., & Sala Garrido, R. (2010). Estudio de viabilidad económica para el tratamiento de aguas residuales a través de un análisis coste beneficio. *Rect@: Revista Electrónica de Comunicaciones y Trabajos de ASEPUMA* (11): 1-25. <https://dialnet.unirioja.es/servlet/articulo?codigo=3673255>
- Huang, C., Mohamed, B. A., & Li, L. Y. (2022). Comparative life-cycle assessment of pyrolysis processes for producing bio-oil, biochar, and activated carbon from sewage sludge. *Resources, Conservation and Recycling*, 181, 106273. <https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2022.106273>
- Jiménez, M. (2018). Valoración de fangos de EDAR vía digestión y cogeneración del biogás [Tesis de licenciatura]. Repositorio documental de la Universidad de Valladolid. <http://uvadoc.uva.es/handle/10324/31341>
- Kacan, E. (2016). Optimum BET surface areas for activated carbon produced from textile sewage sludges and its application as dye removal. *Journal of Environmental Management*, 166, 116-23. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2015.09.044>
- Li, J., Xing, X., Li, J., Shi, M., Lin, A., Xu, C., Zheng, J., & Li, R. (2018). Preparation of thiol-functionalized activated carbon from sewage sludge with coal blending for heavy metal removal from contaminated water. *Environmental Pollution*, 234, 677-683. <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2017.11.102>
- Li, J., Zhang, L., Gou, C., Shi, M., Li, J., Zheng, C. R., Yang, M., Zheng, J., & Li, X. (2017). Removal of Cr (VI) by sewage sludge based activated carbons impregnated with nanoscale zero-valent iron. *Journal of Nanoscience and Nanotechnology*, 17(9): 6936-41. <https://doi.org/10.1166/jnn.2017.14439>
- Li, S., Feng, J., Tian, S., Lan, S., Fan, C., Liu, X., & Xiong, Y. (2018). Tuning role and mechanism of paint sludge for characteristics of sewage sludge carbon: Paint sludge as a new macropores forming agent. *Journal of Hazardous Materials*, 344, 657-68. <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2017.11.012>

- Li, W.-H., Yue, Q.-Y., Gao, B.-Y., Wang, X.-J., Qi, J.-F., Zhao, Y.-Q., & Li, Y.-L. (2011). Preparation of sludge-based activated carbon made from paper mill sewage sludge by steam activation for dye wastewater treatment. *Desalination*, 278(1-3): 179-185. <https://doi.org/10.1016/j.desal.2011.05.020>
- Möller, K., Oberson, a., Bünemann, E. K., Cooper, J., Friedel, j. K., Glæsner, N., Hörtenhuber, S., Løes, A.-K., Mäder, P., Meyer, G., Müller, T., Symanczik, S., Weissengruber, I., Wollmann, I., & Magid, J. (2018). Improved phosphorus recycling in organic farming: Navigating between constraints. *Advances in Agronomy*, 147, 159-237. <https://doi.org/10.1016/bs.agron.2017.10.004>
- Molinos Senante, M., Hernández Sancho, F., & Sala Garrido, R. (2010). Funciones de coste para la gestión de residuos de estaciones depuradoras de aguas residuales. *Anales de ASEPUMA*, (18), 514. <https://dialnet.unirioja.es/servlet/articulo?codigo=6002507>
- Morfil, J. (2021) *Residuos farmacéuticos como precursores de contaminantes emergentes en el recurso hídrico: una revisión de métodos, alternativas de tratamiento e impacto ambiental* [Tesis de bachiller]. Repositorio Universidad de Córdoba. <https://repositorio.unicordoba.edu.co/handle/ucordoba/5116>
- Ovín, A., & Concepción, M. (2011). *Depuración de efluentes industriales con carbón activo. Adsorción de contaminantes y regeneración del adsorbente* [Tesis doctoral]. Universidad de Oviedo. <https://digital.csic.es/handle/10261/34359>
- Pérez, A. (2016). *Estudio bibliográfico del uso de lodos de depuradora en suelos agrícolas* [Tesis de grado]. Universidad Politécnica de Valencia. <https://riunet.upv.es/handle/10251/75981>
- Puchana-Rosero, M. J., Adebayo, M. A., Lima, E. C., Machado, F. M., Thue, P. S., Vagheti, J. C. P., Umpierrez, C. S., & Gutterres, M. (2016). Microwave-assisted activated carbon obtained from the sludge of tannery-treatment effluent plant for removal of leather dyes. *Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects*, 504, 105-115. <https://doi.org/10.1016/j.colsurfa.2016.05.059>
- Ramya, V., Murugan, D., Lajapathirai, C., Saravanan, P., & Sivasamy, A. (2019). Removal of toxic pollutants using tannery sludge derived mesoporous activated carbon: Experimental and modelling studies. *Journal of Environmental Chemical Engineering*, 7(1), 102798. <https://doi.org/10.1016/j.jece.2018.11.043>
- Rashed, M. N., Soltan, M. E., Ahmed, M. M., & Abdou, A. N. A. (2018). Heavy metals removal from wastewater by adsorption on modified physically activated sewage sludge. *Archives or Organic and Inorganic Chemical Sciences*, 1(1). DOI 10.32474/AOICS.2018.01.000102

- Rivera-Utrilla, J., Gómez-Pacheco, C. V., Sánchez-Polo, M., López-Peñalver, J. J., & Ocampo-Pérez, R. (2013). Tetracycline removal from water by adsorption/bioadsorption on activated carbons and sludge-derived adsorbents. *Journal of Environmental Management*, 131, 16-24. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2013.09.024>
- Silva, T. L., Ronix, A., Pezoti, O., Souza, L. S., Leandro, P. K. T., Bedin, K. C., Beltrame, K. K., Cazetta, A. L., & Almeida, V. C. (2016). Mesoporous activated carbon from industrial laundry sewage sludge: Adsorption studies of reactive dye Remazol Brilliant Blue R. *Chemical Engineering Journal*, 303, 467-76. <https://doi.org/10.1016/j.cej.2016.06.009>
- Templeton, I. L. (2016). *Estudio de pares de trabajo (adsorbente/adsorbato) base carbón activado para aplicaciones en sistemas de enfriamiento* [Tesis de maestría]. Repositorio Institucional del Centro de Investigación en Materiales Avanzados. <http://cimav.repositorioinstitucional.mx/jspui/handle/1004/914>
- Vila Gordillo, D. E. (2018). *Dimensionamiento de una EDAR para una población de 60.000 habitantes equivalentes* [Tesis de licenciatura]. Universidad de Cádiz. <http://hdl.handle.net/10498/20046>
- Wang, F. Y., Rudolph, V., & Zhu, Z. H. (2008). *Sewage sludge technologies*. Encyclopedia of Ecology. (pp. 3227-3242). Academic Press. <https://doi.org/10.1016/B978-008045405-4.00078-1>
- Wang, X., Gu, L., Zhou, P., Zhu, N., Li, C., Tao, H., Wen, H., & Zhang, D. (2017). Pyrolytic temperature dependent conversion of sewage sludge to carbon catalyst and their performance in persulfate degradation of 2-Naphthol. *Chemical Engineering Journal*, 324, 203-15. <https://doi.org/10.1016/j.cej.2017.04.101>
- Wang, W., Qiao, W., Peng, C., & Zhang, Z. Z. (2011) Biogas production from supernatant of hydrothermally treated municipal sludge by upflow anaerobic sludge blanket reactor. *Bioresource Technology* (102), 9904-9991. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2011.08.037>
- Xu, H., Xiao, T., Chen, C.-H., Li, W., Meyer, C. A., Wu, Q., Wu, D., Cong, L., Zhang, F., Liu, J. S., Brown, M., & Liu, X. S. (2015). Sequence determinants of improved CRISPR sgRNA design. *Genome Research*, 25, 1147-11457. DOI: 10.1101/gr.191452.115.
- Yang, B., Liu, Y., Liang, Q., Chen, M., Ma, L., Li, L., Liu, Q., Tu, W., Lan, D., & Chen, Y. (2019). Evaluation of activated carbon synthesized by one-stage and two-stage co-pyrolysis from sludge and coconut shell. *Ecotoxicology and Environmental Safety*, 170, 722-31. <https://doi.org/10.1016/j.ecoenv.2018.11.130>
- Zhao, X., Wei, Y., Wang, R., Meng, L., Wang, Y., Li, G., Xin, S., & Zhang, K. (2017). Hydrogen generation from alkaline NaBH₄ solution using a dandelion-like Co-Mo-B

catalyst supported on carbon cloth. *International Journal of Hydrogen Energy*, 42(15), 9945-9951. <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2016.12.130>.

Zhou, Y., Liu, Y., Jiang, W., Shao, L., Zhang, L., & Feng, L. (2019). Effects of pyrolysis temperature and addition proportions of corncob on the distribution of products and potential energy recovery during the preparation of sludge activated carbon. *Chemosphere*, 221, 175-83. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2019.01.026>