

































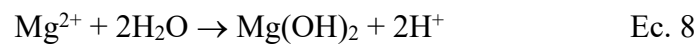






### 3.2.3. Otros ánodos

Aunque los ánodos de hierro/acero y aluminio son los ánodos de sacrificio por referencia utilizados en la electrocoagulación, también se han utilizado en algunos trabajos el uso de materiales anódicos alternativos como los ánodos de zinc y magnesio. Los principios son los mismos que para los ánodos de aluminio y hierro, es decir, también se genera H<sub>2</sub> e iones hidróxido, quedando las reacciones tal y como se muestra a continuación (García-Segura et al. 2017):



Una de las principales diferencias de los ánodos de zinc y/o magnesio frente a los ánodos de hierro y/o aluminio, es que presentan una menor valencia de carga por lo que sería necesaria una mayor concentración de coagulantes para realizar el mismo tratamiento (Devlin et al. 2019). A pesar de ello, las concentraciones residuales tras el tratamiento tienen límites muy dispares siendo de 0,2 mg/L para el aluminio y de 30,0 mg/L para el magnesio, según la Agencia de Protección Ambiental de los Estados Unidos (USEPA) (García-Segura et al. 2017).

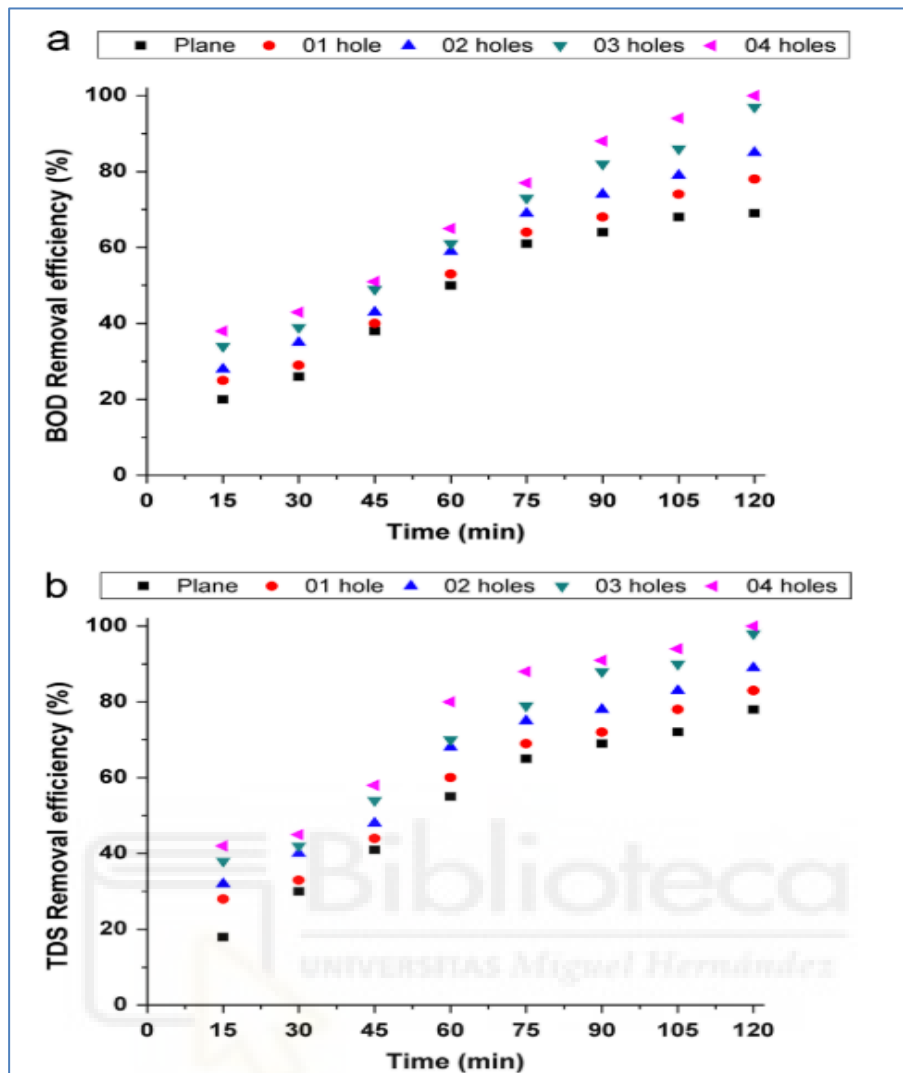


Figura 2. Comparativa de la eficiencia de eliminación de parámetros contaminantes entre electrodos perforados y planos: a) eliminación de la demanda biológica de oxígeno frente al tiempo; y b) eliminación de los sólidos totales disueltos frente al tiempo. Fuente: (Khandegar et al. 2018)

Además del material constitutivo de los electrodos, existen estudios que demuestran que el uso de electrodos perforados favorece en mayor grado el proceso de electrocoagulación frente al uso de electrodos planos (Khandegar et al. 2018), tal y como se muestra en la Figura 2.

En ambos gráficos se puede observar que en todas las circunstancias experimentales, existe una clara predisposición a que la eficiencia de eliminación de parámetros contaminantes se incremente conforme aumente el número de perforaciones en los electrodos ya que al incluir perforaciones, la superficie de contacto (interfaz electrodo-fluido circundante) es mayor, por lo que es factible que se desarrolle una mayor número de reacciones químicas en el proceso de descontaminación.

## **4. ESTUDIO COMPARATIVO DE SISTEMAS DE TRATAMIENTO DE COLORANTES TEXTILES MEDIANTE ELECTROCOAGULACIÓN**

En el siguiente capítulo hablaremos sobre la aplicación de la electrocoagulación en el tratamiento de aguas residuales provenientes de industrias que emplean colorantes, concretamente hablaremos sobre industrias textiles. Como se verá en el capítulo siguiente de análisis bibliométrico, India es el segundo país que encabeza la lista de publicaciones respecto a este tema con un 9%, país en el que se elabora la mayoría del textil actual.

Los efluentes de muchas industrias (textil, cuero, pulpa y papel, estampación, fotografía, cosmética, farmacéutica, alimentaria) contienen colorantes y sus aguas residuales suelen caracterizarse por un pH elevado, un color intenso y una salinidad extremadamente alta, especialmente en el caso de las aguas residuales generadas después de la tintura (Bilińska et al. 2019).

Entre el 20% y el 50% de los colorantes reactivos utilizados en los tejidos pueden liberarse en las vías acuáticas, además son reactivos hidrófilos por lo que tienen baja afinidad a la adsorción a la biomasa y generalmente pasan a través de sistemas biológicos de aguas residuales convencionales (Mahmoud et al. 2013). La acumulación de colorantes en el agua puede dañar gravemente la cadena alimenticia de los seres humanos y los animales, así como el medio ambiente (de Carvalho et al. 2015). También crea olores y colores de agua no deseados, limita la penetración de la luz solar y disminuye la concentración del oxígeno disuelto (Abdulhadi et al. 2019). A todo ello, ha de añadirse que muchos de los colorantes liberados y sus productos de descomposición son tóxicos, cancerígenos o mutagénicos para las formas de vida, principalmente a causa de carcinógenos como la bencidina, el naftaleno y otros compuestos aromáticos (Drahansky et al. 2016).

Los tintes textiles naturales se utilizaron en el procesamiento textil hasta 1856, comenzando en el año 2600 a.C. cuando se mencionó el uso de colorantes en China, basados en colorantes extraídos de recursos vegetales y animales. Los colorantes sintéticos fueron descubiertos por primera vez en 1856 (Drahansky et al. 2016).

A lo largo del tiempo se han utilizado varios métodos para eliminar el tinte de las aguas residuales incluyendo tratamientos biológicos aeróbicos como lodos activos o biofiltros, tratamientos anaeróbicos, biodegradación enzimática, oxidación química, oxidación electroquímica con O<sub>3</sub> y radiación ultravioleta, fotodegradación, adsorción con carbonos activados, coagulación química/floculación, separación por membranas y tratamientos

electrolíticos que incluyen electro-oxidación, electro-floculación y electrocoagulación (Mahmoud et al. 2013). Como ya sabemos, el proceso de electrocoagulación se caracteriza por una rápida y eficiente tasa de eliminación de contaminantes, tamaño compacto del equipo, simplicidad de operación y bajos costos de operación y equipo (Mahmoud et al. 2013). Dicho proceso proporciona una solución sencilla y fiable, además de económica, para el tratamiento de aguas residuales sin necesidad de productos químicos adicionales y, por lo tanto, sin la producción de contaminación secundaria (de Carvalho et al. 2015).

El proceso técnicamente eficiente también debe ser viable desde el punto de vista ecológico y en la electrocoagulación el mayor coste operativo está asociado al consumo de energía eléctrica durante el proceso, pero la aplicación del campo electromagnético podría ser una herramienta para reducir el consumo de energía y diversificar la aplicación de este método para el tratamiento de aguas residuales (Mahmoud et al. 2013). Como la intensidad de corriente es el principal factor de funcionamiento en el tratamiento con electrocoagulación, y la consecuencia es un alto consumo de energía, el tiempo de tratamiento debe ser lo más corto posible para que este proceso se justifique económicamente (Bilińska et al. 2019).

La eficacia de la eliminación del colorante depende directamente de la concentración de iones metálicos producidos en los electrodos. El aumento del tiempo de electrólisis conduce a un aumento tanto de la concentración de iones metálicos como de la acumulación de flóculos de hidróxido, aumentando la eficiencia de eliminación del colorante (Mahmoud et al. 2013). El tipo de electrolito no afecta a la eficacia de la eliminación del color, mientras que el voltaje y la conductividad de las soluciones aplicadas sí, por ello el NaCl es utilizado ampliamente como electrolito a escala industrial dado su bajo coste. Sin embargo, el NaOH tiene mayor conductividad que NaCl para la misma concentración (Mahmoud et al. 2013), aunque la adición de solución ácida para controlar el valor de pH de la solución tratada limita el desarrollo de los flóculos generados (de Carvalho et al. 2015). Además, el porcentaje de eliminación de color es mayor al combinar la aplicación de campos electromagnéticos con la electrocoagulación que si solo se emplea la electrocoagulación (Mahmoud et al. 2013).

#### **4.1. Procesos combinados con electrocoagulación**

El proceso de electrocoagulación puede combinarse con otros procesos que aumenten la eliminación de contaminantes y mejoren los resultados, como ejemplos comentaremos el uso

de cáscara de banana, el tratamiento combinado de electrocoagulación con ozono y la combinación de electrocoagulación con adsorción mediante carbón activado.

Un reciente estudio (de Carvalho et al. 2015) demostró que la cáscara de banana puede utilizarse como coagulante, siendo ésta un coagulante eficaz y de bajo coste y, por lo tanto, ideal para su aplicación en países en vías de desarrollo. Como sabemos, la densidad de corriente no sólo influye en la dosificación del coagulante, sino también en la tasa de formación de burbujas, su tamaño y el crecimiento de los flóculos, por lo que con la adición de cáscara de banana (cantidades entre 2 g/L y 5 g/L) a valores bajos de densidad de corriente se obtiene una eliminación eficaz de colorantes aproximadamente del 99%. La cantidad de cáscara de banana debe ser entre 2 y 5 g/L ya que cantidades superiores a 5 g/L provocaría una disminución significativa del consumo de electrodos y, por consiguiente, disminuiría la eliminación de colorantes como el azul de metileno.

Sin embargo, el aumento de la dosis de cáscara de banana conduce a un bajo pH final de los efluentes tratados, haciendo posible que el proceso de acoplamiento electrocoagulación/cáscara de banana se realice a un valor de pH más favorable (pH neutro), lo que crea estabilidad de  $\text{Al}(\text{OH})_3$  en el agua para la adsorción del contaminante. Al aumentar la concentración inicial del colorante mientras las cantidades de coagulante son constantes, la capacidad de adsorción de los flóculos se vuelve insuficiente y se produce una reducción en la eliminación del color. Esta técnica de combinación de la electrocoagulación con la cáscara de banana para eliminar colorantes, como por ejemplo el azul de metileno, es considerablemente barata y adecuada para los países desarrollados y en vías de desarrollo (de Carvalho et al. 2015).

En estudio de este mismo año (Bilińska et al. 2019), se demostró que la combinación de ozono con electrocoagulación tenía como resultado una eliminación de colorantes mayor al 90%, pero estos resultados varían en función de si los procesos se realizan simultáneamente o en dos pasos consecutivos. La electrocoagulación seguida de una ozonización es un proceso más eficiente, en cuanto al tiempo de tratamiento, que si se realizan de manera simultánea. La dosificación de ozono directamente en el reactor de electrocoagulación puede dar lugar a un mayor consumo de ozono y es muy probable que la mayor parte del ozono utilizado cuando los dos procesos son simultáneos se utilice de forma improductiva, lo que resulta en un tiempo de tratamiento más largo en comparación a cuando se realiza en dos pasos consecutivos. A diferencia de la electrocoagulación con ozonización, en el sistema de electrocoagulación seguida de ozonización, el lodo se separa antes de la ozonización por filtración, por lo que este uso improductivo del ozono en la electrocoagulación con ozonización podría ser causado por

la oxidación adicional del lodo, así como por la descomposición de la superficie del electrodo. Otra notable diferencia era el coste, demostrando que el tratamiento en dos pasos tenía un menor coste que el tratamiento simultáneo (Bilińska et al. 2019).

En otro estudio relevante, Bellebia *et al.* (2009) evaluaron la eliminación de los colorantes *marine blue enrionyl* y *brilliant blue levafix*, combinando la electrocoagulación con la adsorción por carbón activado y cuyos resultados proporcionaron datos importantes para el desarrollo de un proceso combinado capaz de eliminar concentraciones significativas de colorantes recalcitrantes del agua, utilizando un consumo moderado de energía y reduciendo así el coste del tratamiento. Además, la eliminación del color residual por adsorción como tratamiento secundario es más eficaz debido a las cantidades limitadas de colorantes, que sólo requieren pequeñas cantidades de carbón activado. Esta operación mejora la calidad del tratamiento primario de las aguas residuales, no sólo en el caso del color, sino también de la demanda química de oxígeno y la eliminación de olores. Bellebia *et al.*, (2009) llegaron a la conclusión de que la combinación de adsorción y electrocoagulación puede eliminar completamente el color de las aguas residuales debido a que el carbón activado tiene una carga superficial neta positiva durante el proceso de adsorción cuyo efecto es el de atraer la porción negativa del tinte reactivo, lo que provocaría una eliminación completa del tinte en el efluente.

## **4.2. Condiciones óptimas de colorantes**

Los colorantes pueden clasificarse en colorantes ácidos, básicos, directos, azoicos, tina, azufre, reactivos y complejos metálicos (Khandegar y Saroha 2013). Cada uno de estos grupos, presenta propiedades similares en cuanto a condiciones óptimas de eliminación. El conocimiento de tales condiciones óptimas de eliminación, ha suscitado gran interés en la comunidad científica y la industria asociada, habiéndose llegado a establecer una serie de principios fundamentales que quedan recopilados en la Tabla 1.

Tabla 1. Condiciones óptimas de densidad de corriente (i.e., intensidad de corriente / superficie de electrodo), pH y tiempo para un porcentaje de eliminación mayor. Fuente: elaboración propia a partir de datos de los documentos citados en la bibliografía.

Colorante	Densidad de corriente (A/m <sup>2</sup> )	pH	Eficiencia de eliminación (%)	Tiempo (min)	Fuente
Acid black 52	40	5	92 - 95	-	(Khandegar y Saroha 2013)
Acid yellow 220	40	5	98	-	(Khandegar y Saroha 2013)
Marine Blue Erionyl MR	14	3,15	99	5	(Daneshvar et al. 2006)
Brilliant Blue Levafix E-BRA	100	3	99,8	15	(Daneshvar et al. 2006)
Basic Red 46 (BR46)	60	5,5-8,5	99	5	(Daneshvar et al. 2006)
Basic Blue 3 (BB3)	80	5,5-8,5	75	5	(Daneshvar et al. 2006)
Suncion Blue P-3R	45	4-9	95-99,6	-	(Kim et al. 2002)
Suncion Yellow H-E4R	45	4-9	95-99,6	-	(Khandegar y Saroha 2013)
Suncron Blue RD-400	45	4-9	95-99,6	-	(Khandegar y Saroha 2013)



Colorante	Densidad de corriente (A/m <sup>2</sup> )	pH	Eficiencia de eliminación (%)	Tiempo (min)	Fuente
Suncron Yellow 3GE- 200	45	4-9	95-99,6	-	(Kim et al. 2002)
Orange II	160	7,5-8,5	84-98	-	(Daneshvar et al. 2003)
Remazol Red RB 133	150	5-9	92,5	-	(Khandegar y Saroha 2013)
Red198 (RR198)	-	5-6	98	30	(Dalvand et al. 2011)

A modo de síntesis, y una vez analizada pormenorizadamente la bibliografía estudiada, se pueden establecer un decálogo de pautas/principios fundamentales relativos a las condiciones óptimas de electrocoagulación:

- I. La densidad de corriente óptima hace referencia a la cantidad de especies de Al<sup>3+</sup> formadas por disolución del ánodo, que al aumentar permiten una mayor eficiencia de coagulación y una eliminación de colorantes más significativa (Pajootan et al. 2012).
- II. De acuerdo con la ley de Faraday, una cantidad constante de Al<sup>3+</sup> que pase a la solución con la misma densidad de corriente y tiempo para todas las concentraciones de colorantes, producirá la misma cantidad de flóculos en las soluciones con un aumento de la concentración de colorante, disminuyendo así la tasa de eliminación del colorante considerablemente (Pajootan et al. 2012).
- III. Al aumentar la concentración inicial del colorante, la eficiencia de eliminación del colorante disminuye a pesar de trabajar con el valor de pH óptimo.
- IV. La geometría y disposición de los electrodos influye notoriamente en la eficiencia de eliminación de tintes. El empleo electrodos perforados favorece en mayor grado

- el proceso de electrocoagulación frente al uso de electrodos planos (Khandegar et al. 2018).
- V. La variación del consumo de energía eléctrica varía con la concentración de electrolito y la densidad de corriente. Los resultados mostraron que cuando la densidad de corriente aumentaba el consumo de energía eléctrica aumentaba y cuando la concentración de electrolitos aumentaba, el consumo de energía eléctrica disminuía (Pajootan et al. 2012).
  - VI. Cuando el tiempo de contacto aumenta, la cantidad de aluminio generado (disolución electroquímica del electrodo de sacrificio) también aumenta, y por lo tanto, la especiación de la solución se modifica. El equilibrio de la eliminación del colorante se alcanza cuando el coagulante inducido es suficiente como para eliminar la cantidad de colorantes en la solución. Cualquier aumento adicional en el tiempo de contacto será inútil, ya que aumenta el consumo de electrodos y energía (Bellebia et al. 2009).
  - VII. El aumento de la densidad de corriente provoca un aumento correspondiente en la producción de hierro oxidado de los electrodos (Daneshvar et al. 2006).
  - VIII. La eficacia de la eliminación del color depende directamente de la concentración de los iones hidroxilo y metálicos que se producen en los electrodos (Daneshvar et al. 2006).
  - IX. La eficacia de la eliminación de colorantes mejora y el coste del tratamiento se reduce al aumentar el número de pares de electrodos (Kim et al. 2002).
  - X. La electrocoagulación es un proceso exitoso con una alta eficiencia de remoción para eliminar colorantes de efluentes que contienen más de un componente (Pajootan et al. 2012).

## 5. ESTUDIO BIBLIOMÉTRICO

Si bien el desarrollo de las bases teóricas y cuantitativas de los procesos electroquímicos es antiguo, el empleo de la tecnología de electrocoagulación para el tratamiento de aguas residuales ha ganado protagonismo en décadas recientes. Con la finalidad de completar el presente trabajo, se planteó la necesidad de realizar un análisis de la evolución de la producción científica relativa al empleo de la electrocoagulación en el tratamiento de aguas durante las últimas décadas.

El presente estudio bibliométrico pretende mostrar la evolución del número de publicaciones científicas relevantes realizadas desde 1947 hasta la actualidad (finales de 2018), así como aspectos de interés adicionales, tales como en qué países se está desarrollando principalmente la investigación de esta materia, cuales son las personas más relevantes según el número de publicaciones realizadas o qué instituciones de investigación son las mayores precursoras de conocimiento en el ámbito de electrocoagulación y el tratamiento de agua.

La información empleada en el desarrollo de este estudio bibliométrico ha sido obtenida a partir del análisis de resultados de búsqueda de *TITLE-ABS-KEY (electrocoagulation) AND TITLE-ABS-KEY (water)* en la plataforma SCOPUS ([www.scopus.com](http://www.scopus.com)). SCOPUS es accesible para la comunidad universitaria de la UMH y resulta ser la mayor base de datos de resúmenes y citas de literatura científica sometida a revisión por pares, incluyendo revistas científicas, libros y actas de congresos relevantes internacionalmente. Es propiedad del grupo editorial holandés Elsevier.

### 5.1. Publicaciones por fecha

Desde 1947 hasta la actualidad (Figura 3) se han contabilizado un total de 1860 documentos, observándose un notable incremento en la productividad desde 2005 (23 documentos) hasta la actualidad (178 documentos). Esta evolución temporal sugiere un resurgimiento del interés de la comunidad científica por esta tecnología en la última década.

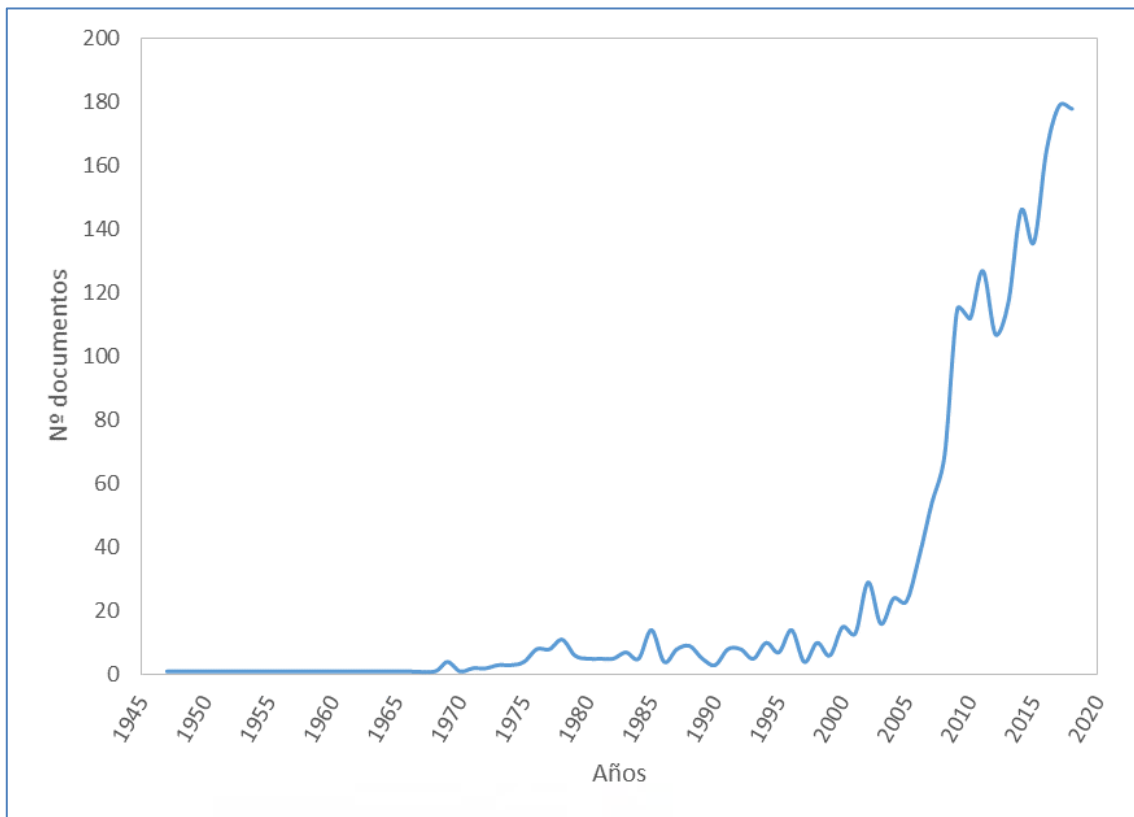


Figura 3. Evolución temporal del número de publicaciones incluidas en el estudio bibliométrico (1947-2019). Fuente: elaboración propia a partir de datos de SCOPUS.

La necesidad de disponer de sistemas de tratamiento de aguas de alto rendimiento de depuración y reducido empleo de productos químicos, que potencialmente pueden generar un residuo peligroso adicional, puede ser el acicate para esta explosión reciente de interés por la tecnología de electrocoagulación.

## 5.2. Publicaciones por disciplina científica

Las principales disciplinas de las revistas en las que se han publicado artículos de electrocoagulación y tratamiento de aguas, quedan recopiladas en el siguiente diagrama circular (Figura 4).

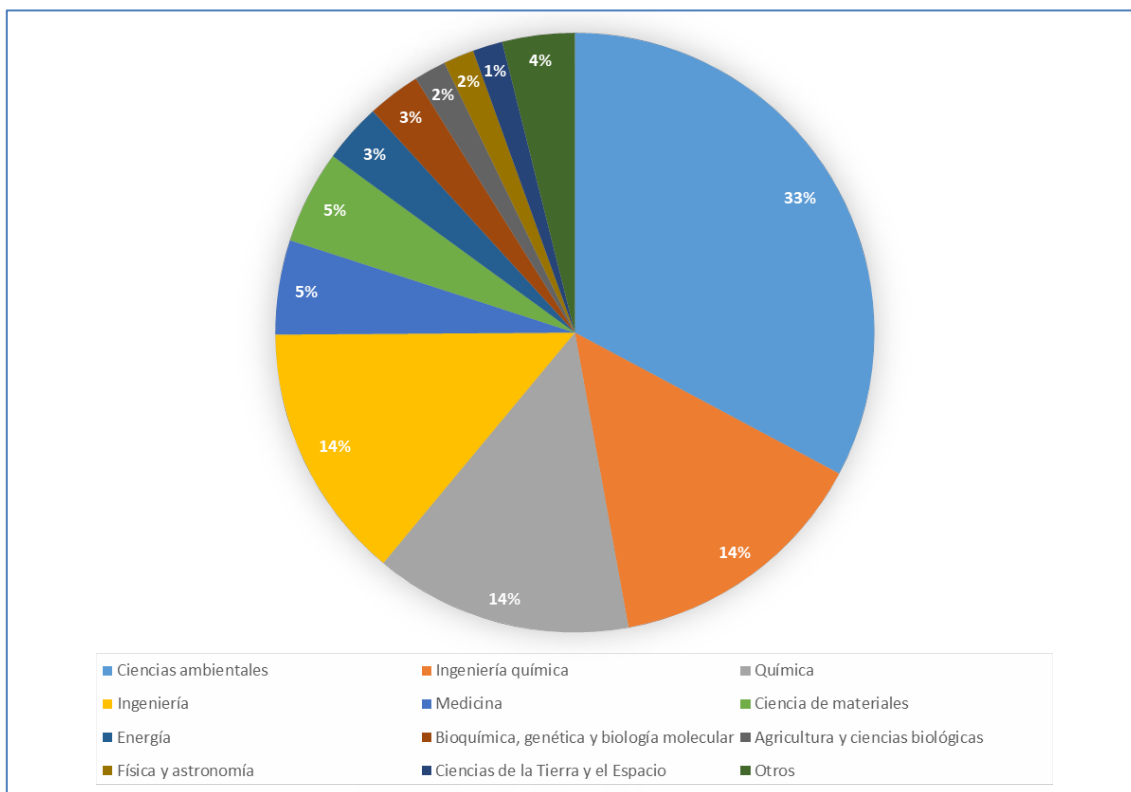


Figura 4. Principales disciplinas científicas de los artículos científicos relativos al empleo de la electrocoagulación para el tratamiento de aguas. Fuente: elaboración propia a partir de datos de SCOPUS.

Destacan los estudios realizados desde las disciplinas de las ciencias ambientales (33%), la ingeniería química (14%), la química (14%) y la ingeniería (14%). Resulta por tanto evidente el interés de emplear la electrocoagulación desde un punto de vista de la ingeniería ambiental.

### 5.3. Publicaciones por fuentes bibliográficas

Las principales revistas científicas en las que se encuentran publicados artículos de la temática de este TFG son (Figura 5) *Journal of Hazardous Materials* (editorial Elsevier), *Desalination and Water Treatment* (vinculada a la *European Desalination Society*), *Water Science & Technology* (publicación de la *International Water Association*), o también *Separation and Water Purification* (editorial Elsevier).

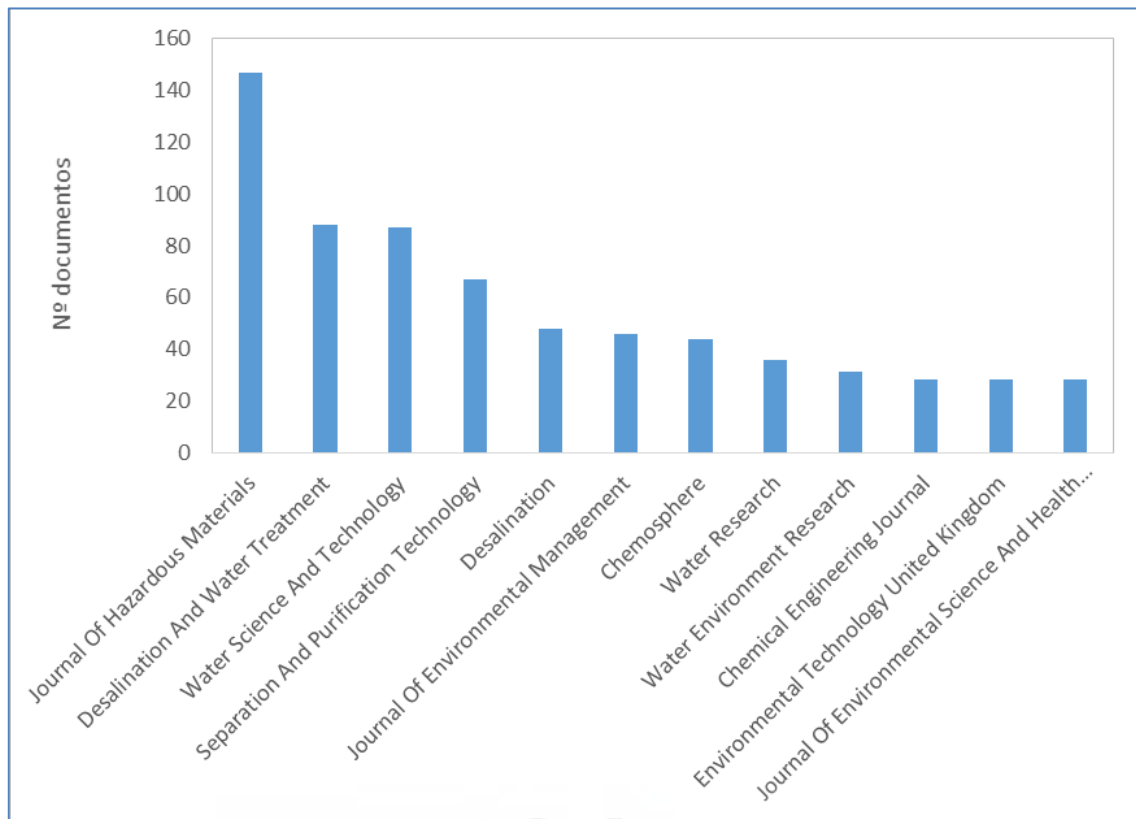


Figura 5. Principales revistas científicas de los artículos relativos al empleo de la electrocoagulación para el tratamiento de aguas. Fuente: elaboración propia a partir de datos de SCOPUS.

Son todas ellas revista de gran prestigio internacional de revisión por pares. Cabe destacar que la revista *Journal of Hazardous Materials* está incluida en el *Journal Citation Report (JCR)* de *Clarivate Analytics*, en el primer cuartil de las disciplinas Ingeniería Ambiental y Ciencias Ambientales.

#### 5.4. Publicaciones por países

Resulta muy interesante analizar la procedencia de los autores más destacados en la materia objeto de este estudio (Figura 6). Es posible apreciar que no existe, digamos, un país que domine a nivel de productividad científica esta disciplina, dado que concurren un extenso número de países, tanto de los que podríamos considerar como desarrollados, así como otros en vías de desarrollo.

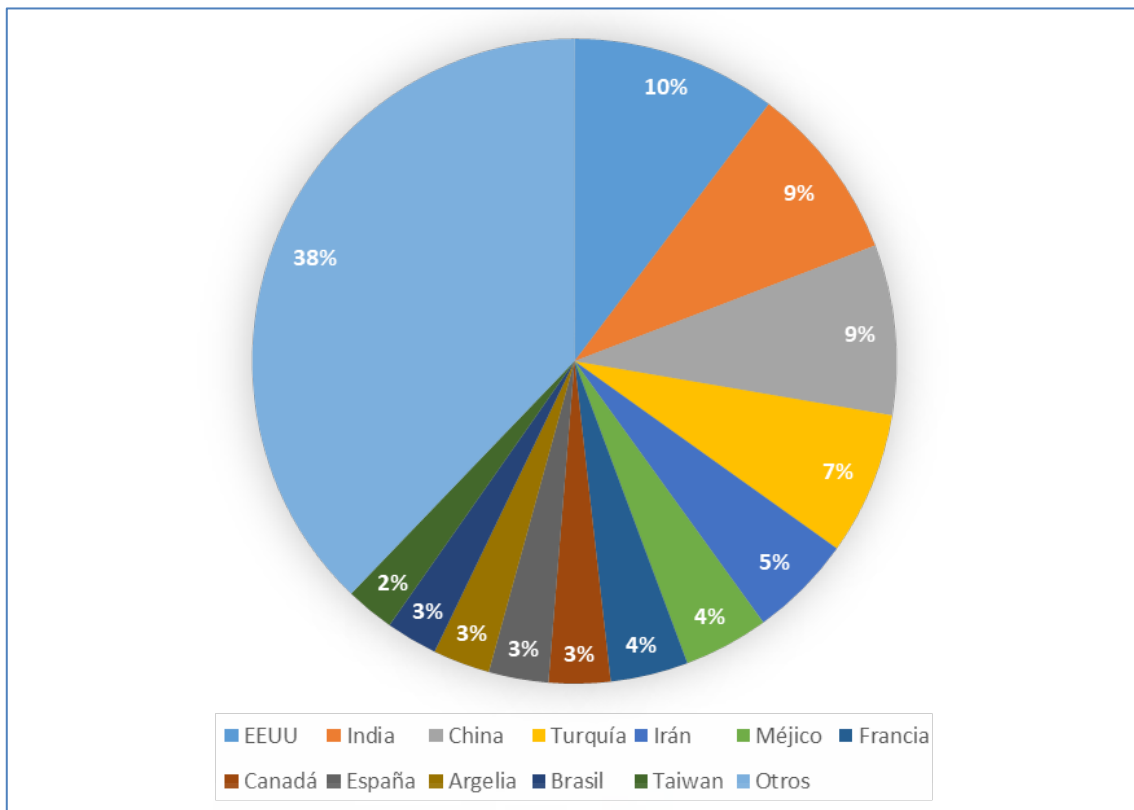


Figura 6. Principales país de origen de las investigaciones relativas al empleo de la electrocoagulación para el tratamiento de aguas. Fuente: elaboración propia a partir de datos de SCOPUS.

Quizás uno de los motivos de esta dispersión los países de origen de la productividad científica, radica en el económico coste de la tecnología de electrocoagulación, así como la capacidad que tiene para permitir el tratamiento de aguas de origen industrial.

### 5.5. Ranking de autores destacados

Finalmente se ha recopilado un listado de las personas con mayor productividad científica en el ámbito de la electrocoagulación para el tratamiento de aguas (Figura 7).

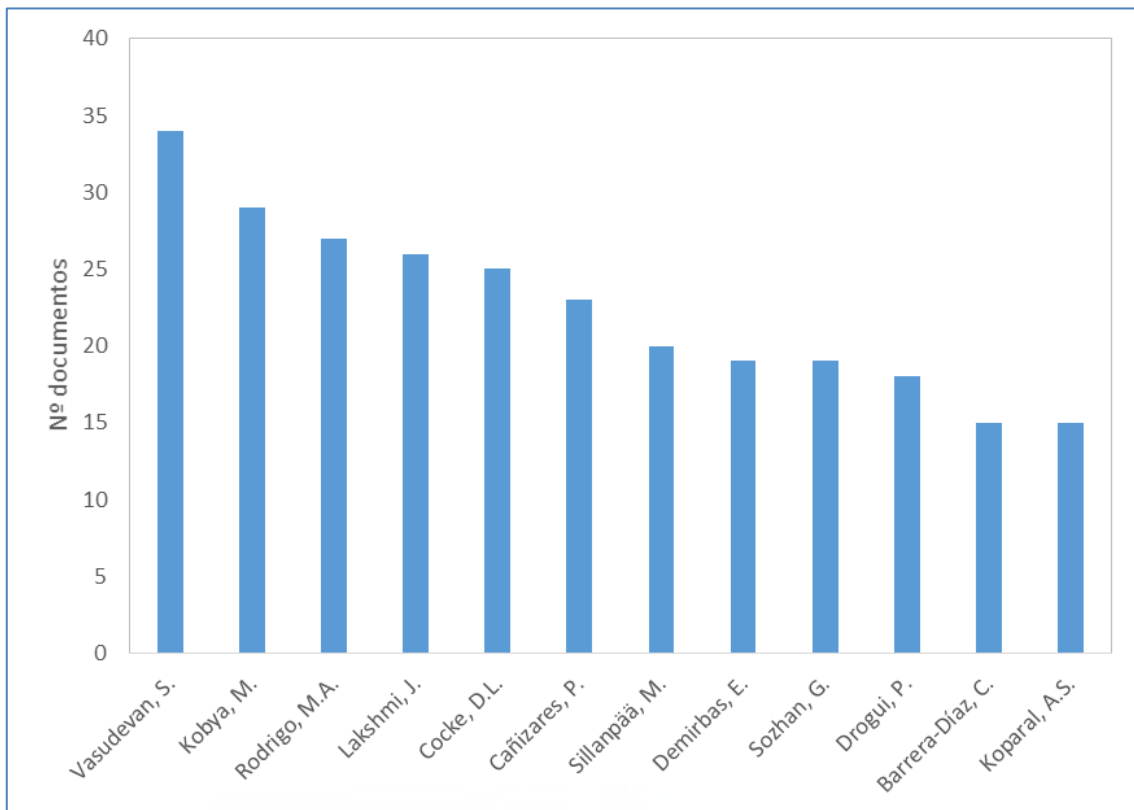


Figura 7. Autores más destacados en el ámbito de la aplicación de la electrocoagulación para el tratamiento de aguas. Fuente: elaboración propia a partir de datos de SCOPUS.

Si bien no existe una figura predominante sobre el total de las personas incluidas en la figura, comentaremos algunos detalles sobre las tres primeras personas. Encabeza el listado Subramanyan Vasudevan del *Central Electrochemical Research Institute* (Nueva Deli, India), seguido de Mehmet Kobya de *Gebze Teknik Üniversitesi* (Kocaeli, Turquía) y completa este particular podio Manuel Andrés Rodrigo de la *Universidad de Castilla-La Mancha* (Ciudad Real, España). Podemos observar que la mayor parte de la investigación en electrocoagulación no tiene por qué estar ubicada en macro instalaciones de investigación, dado que es una tecnología asequible y puede hacerse investigación de calidad con unos recursos más modestos.



## **6. CONCLUSIONES Y PROYECCIÓN FUTURA**

La electrocoagulación es una técnica físico-química aún en desarrollo, pero cuyos resultados son alentadores, dado que puede ser una técnica que permita mejorar el tratamiento de las aguas residuales industriales, tanto en países ricos como en países en vías de desarrollo. Este hecho es fundamental, dado que tales países son los que están experimentando los procesos más graves de contaminación en la actualidad, y desafortunadamente, no se está velando suficientemente por desarrollar infraestructuras de depuración de aguas residuales, al mismo tiempo que se permite una industrialización masiva en su territorio.

Tras lo expuesto a lo largo del trabajo, es posible afirmar que la electrocoagulación es un tratamiento que se puede adaptar a múltiples sistemas de tratamiento de aguas (preexistente o de nuevo diseño), ya que no requiere tanto espacio y equipo como una planta de tratamiento de aguas convencional, siendo además sus costes económicos bastante contenidos.

Los resultados obtenidos de todos los estudios realizados sobre la electrocoagulación demuestran que es una tecnología eficiente, que no requiere emplear reactivos químicos que puedan genera subproductos o residuos no deseados, y además presenta un bajo coste de implantación y mantenimiento. La aplicación de esta técnica para la eliminación de colorantes en las aguas residuales de la industria textil, puede llegar a obtener tasas de eliminación de colorantes superiores al 90%, todo ello con unas infraestructuras más viables de implantar en países con limitados recursos, si las comparamos con las plantas de tratamiento convencionales.

La combinación de la electrocoagulación, con otros tipos de tratamientos, como por ejemplo la ozonización, puede suponer un paso más en cuanto a eficacia de eliminación de contaminante y eficiencia (energética y económica), relativa al tiempo de tratamiento necesario. Esto último redundaría en menores valores de tiempo de retención hidráulico, y por lo tanto, implica la posibilidad de tratar más caudal de agua en un volumen de tanques de tratamiento menor (i.e., menor coste de construcción y mantenimiento). Además, la electrocoagulación combinada con el empleo de coadyuvante de la coagulación de bajo coste, como puede ser el uso de cáscara de banana como coagulante o el carbón activado como adsorbente, se ha evidenciado que mejora los resultados del tratamiento, respecto a los resultados obtenidos si se empleaba la electrocoagulación sola.

Por todo ello, es posible concluir que la electrocoagulación es un tratamiento de gran interés para el tratamiento de aguas residuales, fundamentalmente industriales y con altas

cargas de sustancia tóxicas, y que a tenor de los resultados del estudio bibliométrico presentado, es de gran relevancia e interés, no solo en países punteros en tecnologías e investigación de tratamiento de aguas residuales, sino muy especialmente en países en vías de desarrollo.



## 7. BIBLIOGRAFÍA

A continuación se presentan las referencias bibliográficas y recursos de Internet empleados para la elaboración de esta memoria de Trabajo Fin de Grado.

### 7.1. Referencias bibliográficas

- Abdulhadi BA, Kot P, Hashim KS, et al (2019) Influence of current density and electrodes spacing on reactive red 120 dye removal from dyed water using electrocoagulation/electroflotation (EC/EF) process. *IOP Conf Ser Mater Sci Eng* 584:012035. doi: 10.1088/1757-899x/584/1/012035
- Barrera-Díaz CE, Balderas-Hernández P, Bilyeu B (2018) Chapter 3 - Electrocoagulation: Fundamentals and Prospectives. doi: 10.1016/B978-0-12-813160-2.00003-1
- Bellebia S, Kacha S, Bouberka Z, et al (2009) Color Removal from Acid and Reactive Dye Solutions by Electrocoagulation and Electrocoagulation/Adsorption Processes. *Water Environ Res* 81:382-393. doi: 10.2175/106143008x357200
- Bilińska L, Blus K, Gmurek M, Ledakowicz S (2019) Coupling of electrocoagulation and ozone treatment for textile wastewater reuse. *Chem Eng J* 358:992-1001. doi: 10.1016/J.CEJ.2018.10.093
- Boyd CE (2015) *Water Quality. An introduction*. Second edition. Springer, Heidelberg New York Dordrecht London
- Brillas E, Martínez-Huitle CA (2015) Decontamination of wastewaters containing synthetic organic dyes by electrochemical methods. An updated review. *Appl Catal B Environ* 166-167:603-643. doi: 10.1016/j.apcatb.2014.11.016
- Dalvand A, Gholami M, Joneidi A, Mahmoodi NM (2011) Dye Removal, Energy Consumption and Operating Cost of Electrocoagulation of Textile Wastewater as a Clean Process. *Clean - Soil, Air, Water* 39:665-672. doi: 10.1002/clen.201000233
- Daneshvar N, Ashassi-Sorkhabi H, Tizpar A (2003) Decolorization of orange II by electrocoagulation method. *Sep Purif Technol* 31:153-162. doi: 10.1016/S1383-5866(02)00178-8
- Daneshvar N, Oladegaragoze A, Djafarzadeh N (2006) Decolorization of basic dye solutions by electrocoagulation: An investigation of the effect of operational parameters. *J Hazard Mater* 129:116-122. doi: 10.1016/j.jhazmat.2005.08.033
- de Carvalho HP, Huang J, Zhao M, et al (2015) Improvement of Methylene Blue removal by electrocoagulation/banana peel adsorption coupling in a batch system. *Alexandria Eng J* 54:777-786. doi: 10.1016/J.AEJ.2015.04.003

- Devlin TR, Kowalski MS, Pagaduan E, et al (2019) Electrocoagulation of wastewater using aluminum, iron, and magnesium electrodes. *J Hazard Mater* 368:862-868. doi: 10.1016/J.JHAZMAT.2018.10.017
- Díaz M (ed) (2018) Ecuaciones y cálculos para el tratamiento de aguas. Paraninfo, Madrid, España
- Drahansky M, Paridah M., Moradbak A, et al (2016) Textile Organic Dyes - Characteristics, Polluting Effects and Separation/Elimination Procedures from Industrial Effluents - A Critical Overview. Intech i:13. doi: <http://dx.doi.org/10.5772/57353>
- García-Segura S, Eiband MMSG, de Melo J V, Martínez-Huitle CA (2017) Electrocoagulation and advanced electrocoagulation processes: A general review about the fundamentals, emerging applications and its association with other technologies. *J Electroanal Chem* 801:267-299. doi: 10.1016/j.jelechem.2017.07.047
- García Vaca MC, García Ubaque CA, De Plaza Solórzano JS (2016) Estudio exploratorio del tratamiento de agua de lavado de tintas por método de electrocoagulación/electroflotación. *Rev Tecnura* 20:107. doi: 10.14483/udistrital.jour.tecnura.2016.1.a09
- Izquierdo Sañudo MC, Peral Fernández F, de la Plaza Pérez MA, Troitiño Núñez MD (2013) Evolución histórica de los principios de la química. Universidad Nacional de Educación a Distancia, Madrid, España
- Khandegar V, Acharya S, Jain AK (2018) Data on treatment of sewage wastewater by electrocoagulation using punched aluminum electrode and characterization of generated sludge. *Data Br.* doi: 10.1016/j.dib.2018.04.020
- Khandegar V, Saroha AK (2013) Electrocoagulation for the treatment of textile industry effluent - A review. *J Environ Manage* 128:949-963. doi: 10.1016/j.jenvman.2013.06.043
- Kim TH, Park C, Shin EB, Kim S (2002) Decolorization of disperse and reactive dyes by continuous electrocoagulation process. *Desalination* 150:165-175. doi: 10.1016/S0011-9164(02)00941-4
- Koby M, Can OT, Bayramoglu M (2003) Treatment of textile wastewaters by electrocoagulation using iron and aluminum electrodes. *J Hazard Mater* 100:163-178. doi: 10.1016/S0304-3894(03)00102-X
- Mahmoud MS, Farah JY, Farrag TE (2013) Enhanced removal of Methylene Blue by electrocoagulation using iron electrodes. *Egypt J Pet* 22:211-216. doi: 10.1016/J.EJPE.2012.09.013
- Manci K (2012) Sewage Treatment. *Encycl. Environ. Sci.* 2.
- MARM (2003) Mejores Técnicas Disponibles de referencia europea. Sistema de Gestión y Tratamiento de Agua y Gases Residuales del Sector Químico. Documento BREF. Madrid, España
- Orozco Barrenetxea C, Pérez Serrano A, González Delgado MN, et al (2011) Contaminación ambiental.

Una visión desde la química. Paraninfo, Madrid, España

Pajootan E, Arami M, Mahmoodi NM (2012) Binary system dye removal by electrocoagulation from synthetic and real colored wastewaters. *J Taiwan Inst Chem Eng* 43:282-290. doi: 10.1016/j.jtice.2011.10.014

Ramalho RS (1996) Tratamiento de aguas residuales. Editorial Reverte, Barcelona, Spain

Sillanpää M, Shestakova M (2017) Chapter 2 - Electrochemical Water Treatment Methods. doi: 10.1016/B978-0-12-811462-9.00002-5

SUEZ-DEGREMONT (2019) Water Treatment Handbook. [www.suezwaterhandbook.com](http://www.suezwaterhandbook.com). Accessed 29 nov 2019

Tchobanoglous G, Burton FL, Stensel HD (2003) Wastewater Engineering. Treatment and Reuse. Fourth Edition. Metcalf & Eddy. McGraw-Hill Education, New York, USA

Weiner RF, Matthews R (2003) Environmental Engineering. Fourth Edition. Butterworth-Heinemann, Burlington (MA), USA

## 7.2. Recursos de Internet

SCOPUS. Base de datos de documentos científicos revisados por pares. URL [www.scopus.com](http://www.scopus.com)  
[Último acceso: 29-11-2019]

SCIENCEDIRECT. Base de datos de documentos científicos. URL [www.sciencedirect.com](http://www.sciencedirect.com)  
[Último acceso: 29-11-2019]