

TRATAMIENTO DE AGUAS RESIDUALES

EVALUACIÓN DE ALTERNATIVAS PARA EL TRATAMIENTO DE AGUAS RESIDUALES DE LA INDUSTRIA GALVÁNICA

EVALUATION OF ALTERNATIVES FOR THE TREATMENT OF WASTEWATER FROM THE GALVANIC INDUSTRY

Jesica Viviana Mariño Molina
Ingeniero Químico
Universidad Militar Nueva Granada
Bogotá, Colombia.
est.jesica.marino@unimilitar.edu.co

Artículo de Investigación

DIRECTOR

Ph.D. Ximena Lucía Pedraza Nájar

Doctora en Administración – Universidad de Celaya (México)
Magíster en Calidad y Gestión Integral – Universidad Santo Tomás e Icontec
Especialista en gestión de la producción, la calidad y la tecnología - Universidad Politécnica de Madrid (España)
Especialista en gerencia de procesos, calidad e innovación – Universidad EAN (Bogotá D.C.)
Microbióloga Industrial – Pontificia Universidad Javeriana
Auditor de certificación: sistemas de gestión y de producto
Gestora Especialización en Gerencia de la Calidad - Universidad Militar Nueva Granada
ximena.pedraza@unimilitar.edu.co; gerencia.calidad@unimilitar.edu.co



La U
acreditada
para todos

**ESPECIALIZACIÓN EN GESTIÓN INTEGRAL AMBIENTAL
UNIVERSIDAD MILITAR NUEVA GRANADA
FACULTAD DE INGENIERÍA
JUNIO DE 2022**

TRATAMIENTO DE AGUAS RESIDUALES

EVALUACIÓN DE ALTERNATIVAS PARA EL TRATAMIENTO DE AGUAS RESIDUALES DE LA INDUSTRIA GALVÁNICA

EVALUATION OF ALTERNATIVES FOR THE TREATMENT OF WASTEWATER FROM THE GALVANIC INDUSTRY

Jesica Viviana Mariño Molina
Ingeniero Químico
Universidad Militar Nueva Granada
Bogotá, Colombia.
est.jesica.marino@unimilitar.edu.co

RESUMEN

El artículo presenta la revisión de las diferentes tecnologías para el tratamiento de agua residual, más empleadas y eficientes para la remoción de contaminantes provenientes del proceso de la industria galvánica, caracterizada por generar grandes cantidades de efluentes con alta carga de compuestos tóxicos. El proceso de electrodeposición para los recubrimientos metálicos emplea el uso de sustancias químicas como ácidos, álcalis, sales metálicas, metales pesados y cianuro, que al ser vertidas a los cuerpos de agua pueden provocar afectaciones graves a la salud y a los ecosistemas, ocasionando pérdida de biodiversidad y muerte de las poblaciones. Durante varios años se han estudiado tecnologías convencionales y procesos avanzados de tratamiento, como la coagulación-floculación, oxidación con peróxido de hidrogeno y permanganato potásico, precipitación química, intercambio iónico, membranas de filtración, electrocoagulación y los procesos avanzados de oxidación, que permiten lograr el cumplimiento normativo ambiental vigente para cuerpos de agua superficial y/o Alcantarillado Público.

Palabras clave: galvánica, metales pesados, tratamiento, remoción, recubrimientos, sustancias toxicas.

ABSTRACT

The article presents a review of the different technologies for wastewater treatment, most used and efficient for the removal of contaminants from the galvanic industry process, characterized by generating large amounts of effluents with a high load of toxic compounds. The electrodeposition process for metallic coatings employs the use of chemical substances such as acids, alkalis, metallic salts, heavy metals and cyanide, which when discharged into bodies of water can cause serious damage to health and ecosystems, causing loss of biodiversity and death of populations. For several years, conventional technologies and advanced treatment processes have been studied, such as coagulation-flocculation, oxidation with hydrogen peroxide and potassium permanganate,

TRATAMIENTO DE AGUAS RESIDUALES

chemical precipitation, ion exchange, filtration membranes, electrocoagulation and advanced oxidation processes, which allow achieving current environmental regulatory compliance for bodies of surface water and/or Public Sewerage.

Keywords: galvanic, heavy metals, treatment, removal, coatings, toxic substances.

INTRODUCCIÓN

La contaminación de fuentes hídricas con compuestos altamente tóxicos, particularmente por efluentes provenientes de tratamientos y revestimiento de metales de origen galvánico, ha generado gran preocupación en el mundo por el impacto en la pérdida de ecosistemas y afectaciones a la salud pública de la población principalmente por la presencia de metales pesados y cianuro en el agua.

En Colombia, se producen $4,5 \times 10^6$ m³/mes de aguas residuales domésticas e industriales y alrededor del 90% son vertidas en fuentes hídricas siendo la principal fuente de contaminación de cuerpos de agua (Garzón, 2021). Por ejemplo, el Observatorio Regional Ambiental y de Desarrollo Sostenible del Río Bogotá (2017), reporta que en el año 2019 se identificaron 777 vertimientos de aguas residuales a la Cuenca, dando como resultado un índice de calidad del agua en el tramo de la desembocadura del Río de 0.37 para el segundo semestre del año 2019, lo cual indica la mala calidad fisicoquímica del agua por problemas de contaminación. Por otra parte, en el Informe Quincenal Epidemiológico Nacional (2017) se reportaron en el año 2015, 319 casos de intoxicación por metales en Colombia (p. 31).

La presencia de metales pesados en los cuerpos hídricos puede ocasionar efectos nocivos a la salud de la población debido a su toxicidad y bioacumulación que conlleva a generar afectaciones en el sistema nervioso, pérdida de funciones orgánicas, cáncer de pulmón, daño en los riñones e hígado, intoxicaciones agudas e incluso la muerte. Así mismo, es una amenaza para

TRATAMIENTO DE AGUAS RESIDUALES

el ambiente y los sistemas ecológicos debido a que por escorrentía o infiltración pueden resultar depositados en suelos, afectando la cadena trófica (Pabón *et al.*, 2020).

El proceso de tratamiento y revestimiento de metales se basa en una técnica en la que se lleva a cabo un recubrimiento metálico sobre una superficie con el fin de dar acabado a la pieza, mejorar sus propiedades físicas y mecánicas, aumentar la resistencia a la corrosión, entre otras. Este proceso, involucra grandes cantidades de agua residual con alta carga contaminante, proveniente principalmente por las actividades de decapado, limpieza, desengrase, enjuague, derrames y mantenimiento de los baños electrolíticos, los cuales contienen compuestos tóxicos, como cianuros, ácidos, alcalinos, metales pesados (plomo, cobre, cromo, níquel, entre otros), sales y otras sustancias peligrosas, lo que hace que, el agua presente dificultad para su tratamiento y pueda generar un impacto negativo a los cuerpos de agua (Ocampo, 2019).

A nivel mundial mediante los objetivos de desarrollo sostenible adoptados en la agenda 2030 se han planteado metas para mejorar la calidad de agua, reduciendo la cantidad de aguas residuales sin tratar que permitan garantizar la disponibilidad y el acceso de agua limpia (Naciones Unidas, 2022). Por lo que se hace necesario, la búsqueda de nuevas tecnologías que permitan remover compuestos altamente tóxicos, como es el caso de Perú, que desarrolla tecnologías para la recuperación de agua contaminada con metales pesados. Mediante el boletín Tecnológico del 2019, elaborado por el instituto de salud de Perú, se evidencia la evolución de tecnologías de tratamiento de aguas residuales basadas en procesos de intercambio iónico, métodos electroquímicos, tratamientos biológicos, osmosis y floculación, las cuales son patentadas y financiadas para la remoción de Pb, Hg, Cd y As mediante el análisis de las invenciones realizadas a nivel mundial por países líderes en la investigación y solicitud de patentes de tecnologías de tratamiento como lo son: China , Estados Unidos y Rusia (pp.12-14).

TRATAMIENTO DE AGUAS RESIDUALES

Como resultado de las exigencias normativas establecidas en el Decreto 1076 del 2015, artículo 2.2.3.2.20.5, en lo que refiere a la prohibición de verter sin tratamiento previo para la conservación y preservación de las aguas y cauces, y de acuerdo con las estrategias para el cumplimiento de los ODS en Colombia con relación a mejorar la calidad del agua reduciendo la contaminación y la cantidad de aguas residuales sin tratar con el fin de garantizar la disponibilidad de agua libre de impureza, se han evaluado en Colombia tecnologías de electrocoagulación que emplean fundamentos de electroquímica, coagulación y floculación para la remoción de contaminantes de los vertimientos de la industria galvánica (León y Aramburú, 2021).

MATERIALES Y MÉTODOS

La metodología investigativa del presente artículo se realiza comprendiendo las etapas principales del proceso de recubrimientos metálicos con el fin de identificar los contaminantes más comunes en los vertimientos que realiza la industria para generar alternativas de tratamiento y remoción de los parámetros más críticos.

Galvanotecnia

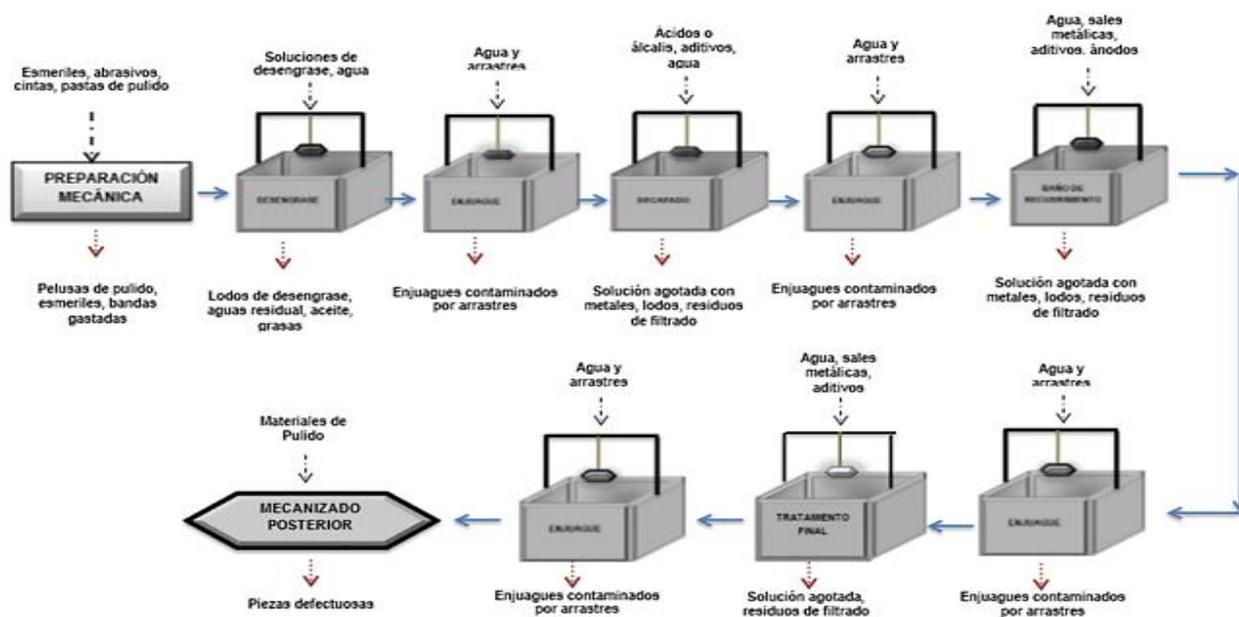
Es una técnica utilizada con el fin de proteger la superficie de una pieza, mejorar su aspecto, dar una capa protectora contra la corrosión, Incremento de la resistencia a la fricción, mejoramiento de propiedades eléctricas, aumentar la resistencia mecánica y adicionalmente se usa también con fines decorativos para partes metálicas y plásticas con metales como: cromo, cobre, níquel, zinc, plata, oro, entre otros baños preciosos, a través de la electrodeposición de una capa de metal. Este proceso se basa en procesos de deposición electrolítica de un metal sobre

TRATAMIENTO DE AGUAS RESIDUALES

otro metal, mediante inmersión en baños electrolíticos de diferente composición, donde los iones metálicos se reducen en la pieza a recubrir en soluciones ácidas, alcalinas o neutras con ayuda de corriente eléctrica continua por medio de un ánodo y un cátodo que permite el proceso de electrodeposición a partir de fenómenos de oxido-reducción. La pieza pasa por un baño químico, por lo general una inmersión en un ácido donde se elimina polvo, suciedad y grasa, posteriormente se realizan lavados y se introduce la pieza en los baños electrolíticos, tal como se muestra en la figura 1 del proceso general del galvanizado (Quintero y Virguez, 2017).

Figura 1

Proceso general de galvanizado



Nota: Principales etapas del proceso de la industria galvánica

Fuente: Ministerio de Salud y Protección Social, 2015

TRATAMIENTO DE AGUAS RESIDUALES

Tabla 1

Residuos líquidos industria galvánica

RESIDUO	RIESGO	CORRIENTE	PROCESO
Alcalis	Corrosividad	Residuo líquido	Limpieza y electrodepósito
Acidos (nitríco, sulfúrico, clorhídrico, fluorhídrico)	Toxicidad	Residuo líquido	Limpieza
Detergentes	Toxicidad	Residuo líquido	Limpieza
Aceites y grasas	Toxicidad	Residuo líquido, solvente agitado	Limpieza
Cianuro	Toxicidad	Baño de recubrimiento, agua de lavado, otras aguas, lodos.	Electrodepósito, remoción, tratamiento calórico, desmanchado.
Cromatos	Toxicidad	Baño de recubrimiento, agua de lavado, lodos, otros	Electrodepósito, cromado, recubrimiento

Nota: FUNDES, s.f

Las descargas de agua residual en la industria galvánica dependiendo del tamaño de la planta, oscila entre 0.05 m³/hora y 0.2 m³/hora debido a los vertimientos generados en las etapas de Aguas de lavado, enjuague y enfriamiento, derrames, Mantenimiento de baños de proceso, Baños de remoción y acondicionamiento, Soluciones de sistemas de lavado/extracción de gases (FUNDES, s.f).

Como se observa en la Figura 1, la industria galvánica involucra en su proceso el uso de sustancias químicas como álcalis, ácidos, sales, cianuro, metales pesados sólidos en suspensión, sustancias tóxicas disueltas y grasa proveniente de los baños de desengrase, igualmente, gran consumo de agua en los baños de proceso, en las etapas de lavado y enjuague, lo que genera que los vertimientos líquidos puedan presentar características ácidas o Básicas dependiendo de la composición del baño (FUNDES, s.f).

TRATAMIENTO DE AGUAS RESIDUALES

Tabla 2.

Efectos de los contaminantes sobre el Alcantarillado y las aguas superficiales.

Parámetro	Efecto sobre instalaciones de alcantarillado	Efecto sobre aguas superficiales
pH	Daño a los colectores, por exceso de acidez o alcalinidad. Inhibición del crecimiento microbiano en los sistemas de tratamiento biológico de las aguas servidas.	Efectos sobre las aguas destinadas a consumo humano, bebida animal, riego, recreación, estética y vida acuática.
Temperatura	Aumento de las velocidades de reacciones químicas y bioquímicas, ocasionado por un aumento de temperatura. Volatilización de compuestos orgánicos presentes en los residuos líquidos, con gasificación y producción de emanaciones tóxicas y mal olor. La presencia de gases aumenta la presión de las tuberías	Las altas temperaturas desfavorecen la dilución de oxígeno en la masa de agua, alterando el desarrollo de la vida acuática.
Sólidos suspendidos	Se produce acumulación de sedimentos al interior de las tuberías, produciendo efectos de obstrucción de escurrimiento de fluidos.	Se produce acumulación de sedimentos que ocasionan embancamiento y depósitos de terrenos de uso agrícola.
Aceites y Grasas	Se produce acumulación y se dificulta el escurrimiento de fluidos. Además, disminuye la transferencia de oxígeno en el cuerpo receptor.	Efectos sobre la absorción de oxígeno atmosférico en el agua, afectando los procesos de fotosíntesis de algas, plantas y organismos acuáticos en general.
Metales Pesados y tóxicos	Interfieren en los procesos biológicos de tratamiento de aguas servidas, inhibiendo el crecimiento microbiano.	Interfieren en los procesos naturales de autodepuración biológica de cuerpos receptores.
Detergentes	Interfieren en los procesos biológicos de tratamiento de aguas servidas, inhibiendo el desarrollo microbiano.	Interfieren en los procesos de absorción de oxígeno, creando ambientes anaerobios.

Nota: FUNDES, s.f

Demanda Bioquímica de Oxígeno (DBO)

Cantidad de oxígeno requerida para oxidar la materia orgánica del agua, por medio microorganismos (Del Consuelo y Peña, 2021).

TRATAMIENTO DE AGUAS RESIDUALES

Demanda Química de Oxígeno (DQO)

Medida del oxígeno que equivale a la porción de materia orgánica e inorgánica del agua, que es susceptible de oxidarse químicamente (Del Consuelo y Peña, 2021).

Cianuro

Radical químico, formado de un átomo de carbono enlazado a un átomo de nitrógeno mediante un enlace triple ($C\equiv N^-$). El cianuro o compuestos sintéticos de éste, son tóxicos para la mayoría de los organismos (Estrada, 2019).

Metales Pesados

Son elementos químicos con alta densidad, número atómico por encima de 20, como lo son: aluminio (Al), cobre (Cu), cobalto (Co), hierro (Fe), estaño (Sn), manganeso (Mn), mercurio (Hg), cadmio (Cd), arsénico (As), plomo (Pb), cromo (Cr), molibdeno (Mo), níquel (Ni), selenio (Se), plata (Ag), oro (Au) y zinc (Zn) (Estrada, 2019).

Etapas de tratamiento de agua residuales:

Pretratamiento. Etapa inicial que se aplica antes del tratamiento primario y se basa en la separación física o retención de objetos mayores que estén presentes en el agua residual. Incluye operaciones como cribado (separación de los cuerpos mayores) y desarenación (separación de la materia inorgánica por sedimentación simple o inducida mecánicamente) (Del Consuelo y Peña, 2021).

Tratamiento primario

El objetivo de esta etapa es separar los sólidos sedimentables y el material flotante (detergentes, grasas y aceites, natas y espumas, entre otros materiales), para reducir en contenido de sólidos suspendidos. Adicionalmente, consiste también en proceso fisicoquímico, se realiza la

TRATAMIENTO DE AGUAS RESIDUALES

adición de químicos, mezclado, floculación y sedimentación; con este proceso se remueven adicionalmente fosfatos (Del Consuelo y Peña, 2021).

Tratamiento secundario

Etapa de tratamiento de carácter biológico, el cual puede ser anaerobio o aerobio. Se encuentran sistemas de medio fijo (filtros biológicos y biodiscos) y de medio suspendido (lodos activados en sus diversas variantes y lagunas de estabilización) (Del Consuelo y Peña, 2021).

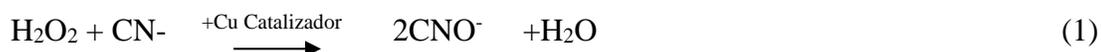
Tratamiento terciario.

Tratamiento avanzado que se encarga de la remoción de uno o varios contaminantes en particular, después del pretratamiento, tratamientos primario y secundario, utilizado para requerimientos más estrictos para las descargas o el reúso de las aguas residuales. Entre los principales tratamientos se encuentran: ultrafiltración, remoción de fósforo, cloración, intercambio iónico, ósmosis inversa, electrodiálisis, adsorción con carbón, lodos activados con adición de carbón activado en polvo, oxidación química, precipitación química, entre otros (Del Consuelo y Peña, 2021).

Tecnologías de tratamiento de aguas residuales

Tratamiento con peróxido de hidrogeno

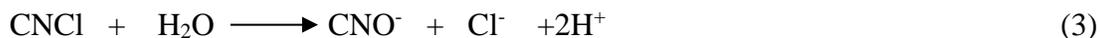
Para este tratamiento se necesita de un catalizador, que puede ser vanadio, cobre, plata o tungsteno en concentraciones de 5 a 50ppm. El producto final de la reacción es el cianato (CNO^-). El H_2O_2 a utilizar en el proceso se añade como una solución de concentración al 50%. La reacción de degradación del cianuro obteniendo cianato es como se muestra en la ecuación (Viña, 2019)



TRATAMIENTO DE AGUAS RESIDUALES

Cloración alcalina

Esta técnica es una de las más antiguas y utilizadas para el tratamiento de aguas residuales industriales de compuestos de cianuro. El primer producto obtenido en esta reacción es el cloruro de cianógeno (CNCl), el cual se considera como un gas muy tóxico. El CNCl se hidroliza en ion cianato (CNO⁻) a pH alcalino, este factor resulta muy importante para la ruptura de CNCl. Al obtener el CNO⁻ se puede seguir oxidando con cloro a pH casi neutro y al acidificarse se obtiene el NH₄⁺ (Viña, 2019).



Esta técnica para los compuestos de cianuro es relativamente rápida, sin embargo, depende de la constante de disociación. Por ejemplo, los complejos de cianuro metálico como níquel, plata, oro y cobalto necesitan más tiempo de reacción y un exceso de cloro (Viña, 2019).

Oxidación mediante permanganato potásico

El KMnO₄, permanganato potásico, es un oxidante que se utiliza cada vez más en los tratamientos de aguas residuales. El pH al que se realiza el proceso de oxidación para lograr una reacción eficaz debe ser fuertemente alcalino (pH 12-14) ya que este parámetro influye mucho en la tasa de oxidación de los iones cianuro (Fernandez *et al*, 2021).



La remoción del cianuro a diferentes concentraciones de cianuro inicial alcanza a porcentajes del 99% de degradación (Fernandez *et al*, 2021).

TRATAMIENTO DE AGUAS RESIDUALES

Tabla 3

Remoción de Cianuro a diferentes concentraciones iniciales

KCN inicial (mg/L)	KCN inicial (mM)	CN degradado (%)	NO ₂ (mM)	NO ₃ ⁻ (mM)	Relación molar intermedios/CN
100	3.9	99	2.4	1.4	0.99
200	7.7	91	3.8	3.1	0.98
400	15.4	86	8.5	4.3	0.96
100	19.2	77	9.2	5.4	0.99

*Concentración variable y relación másica KMnO₄/CN de 5:1; pH = 12 y 20 min de agitación.Nota: Fernandez *et al*, (2021)***Procesos avanzados de oxidación***

Los PAO se basan en el empleo de especies altamente reactivas y fuertemente oxidantes, como el radical hidroxilo (OH⁻), el cual es generado en el proceso. Esta técnica es fundamentada con el proceso de fotocátalisis, el cual es definido como la aceleración de una reacción química con un catalizador que se activa mediante la radiación. Son utilizados cuando el proceso de degradación convencional no logra obtener el grado de remoción requerido. El fotocatalizador más utilizado, es el dióxido de titanio (TiO₂) por su bajo costo, alta actividad fotocatalítica y estabilidad química. Sin embargo, requiere de luz ultravioleta para su activación. La oxidación foto catalítica permite lograr la transformación del cianuro en cianato, el cual es menos toxico (Viña, 2019).

Precipitación química

La precipitación química es uno de los tratamientos más empleados para la eliminación de metales en aguas residuales con componentes inorgánicos. La degradación de los metales en el agua depende de dos elementos: la solubilidad de la especie y la separación del solido de la solución acuosa, estos factores hacen que la precipitación química sea poco efectiva cuando las

TRATAMIENTO DE AGUAS RESIDUALES

concentraciones del metal son muy bajas al requerir de un exceso de precipitante para lograr formar el precipitado (Sarria et al, 2020).



En la ecuación, M^{2+} son los iones del metal disuelto, OH^{-} el precipitante, y $M(OH)_2$ es el hidróxido del metal insoluble. El pH, se debe encontrar alcalino (pH de 9 a 11), ya que este factor influye significativamente en la eficiencia de la precipitación del metal (Sarria et al, 2020).

Intercambio iónico

El proceso consiste en la interacción electrostática dada por las fuerzas de atracción de coulomb cuando un ion de una disolución hace un intercambio por otro ion de igual carga que se encuentra unido a una partícula solida móvil (Sarria et al, 2020).

Membranas de filtración

El proceso se basa en la diferencia de presión a través de la membrana para superar el gradiente de presión osmótica. Es así, como los iones son separados del disolvente al no poder atravesar la membrana. Esta membrana permite separar solidos suspendidos, compuestos orgánicos e inorgánicos como lo son los metales pesados (Pabón et al, 2020).

Existen diferentes tipos de membranas según sus características como su peso molecular, material de la membrana solubilidad del soluto y solvente, permeabilidad, tamaño de partícula. Entre estas se encuentran la ultrafiltración, nanofiltración y osmosis reversa para remover metales pesados presentes en aguas residuales (Pabón et al, 2020).

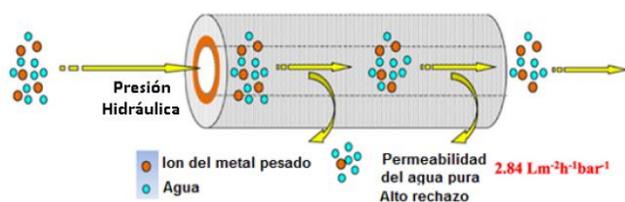
Según investigaciones, las técnicas de osmosis inversa y nanofiltración presentan alta eficiencia en la remoción de cobre, con resultados de 98% y 90%, respectivamente.

Adicionalmente, para el cadmio la nanofiltración permite remover hasta un 99% en el agua residual (Sarria et al, 2020)

TRATAMIENTO DE AGUAS RESIDUALES

Figura 2

Membrana de nanofiltración para eliminar metales en el agua.



Nota. Sarria et al (2020)

Esta técnica es generalmente usada en procesos de galvanoplastia para la recuperación de sales metálicas, reciclaje de aceites, entre otros (Pabón et al, 2020)

Coagulación- floculación

Esta técnica se basa en la desestabilización de un coloide para su aglomeración. En la coagulación se elimina la doble capa eléctrica de los coloides y luego en la floculación se aglomeran los coloides mediante la atracción de partículas con la aglutinación de los floculantes. Entre las características más importantes a tener en cuenta para el empleo de esta técnica está la dosis química adecuada del coagulante y floculante, el pH, la temperatura y la alcalinidad (Pabón et al, 2020).

Este tipo de tratamiento aplicado en la industria galvánica ha mostrado ser eficiente en la remoción de metales pesados. Para este proceso se utilizan polímeros o polielectrolitos de origen sintético que son especialmente eficientes en la sedimentación, debido a que son capaces de formar el floc a bajas temperaturas (Ibarra, 2020).

Electrocoagulación

Es una técnica con el mismo principio de la coagulación-floculación pero con electroanalítica, en la cual son desestabilizadas las partículas de contaminantes que se encuentran suspendidas en un medio acuoso, induciendo corriente eléctrica en el agua a través de placas

TRATAMIENTO DE AGUAS RESIDUALES

metálicas. El ánodo, usualmente es de aluminio o hierro, este se disuelve electrolíticamente formando sus respectivos cationes Al^{3+} y Fe^{2+} , y en el cátodo se produce hidrógeno que se libera como pequeñas burbujas que suben a la superficie con las partículas floculadas de contaminante, siendo este lodo retirado posteriormente por rascadores. Esta técnica permite el 100% de la remoción de cromo IV, otros metales pesados, cianuros y aceites (Del Consuelo y Peña, 2021).

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Normatividad de vertimientos en Colombia

En Colombia, el Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible el 17 de marzo decretó la Resolución 631 de 2015 “Por la cual se establecen los parámetros y los valores límites máximos permisibles en los vertimientos puntuales a cuerpos de aguas superficiales y a los sistemas de alcantarillado público y se dictan otras disposiciones”, con el fin de fijar los parámetros y los valores límites máximos permisibles de acuerdo con las actividades industriales, comerciales o de servicios que deberán cumplir los vertimientos puntuales.

Adicionalmente, en el artículo 13 establece para los vertimientos a aguas superficiales los “Parámetros Físicoquímicos a monitorear y sus valores límites máximos permisibles en los vertimientos puntuales de aguas residuales no domésticas-ARnD a cuerpos de aguas superficiales de actividades asociadas con fabricación y manufactura de bienes” definido para la actividad “Tratamiento y revestimiento de metales” la cual es aplicable para la industria galvánica. Con respecto a los vertimientos realizados al Alcantarillado Público, el Artículo 16 de la norma en mención, fija los límites máximos permisibles para cada parámetro de la actividad del Artículo 13. (Se aplican las mismas exigencias establecidas para el parámetro respectivo en

TRATAMIENTO DE AGUAS RESIDUALES

la actividad específica del Artículo 13 para los vertimientos puntuales a cuerpos de agua superficiales y algunos de estos son multiplicados por un factor de 1.50).

Tabla 4

Valor máximo permisible de los vertimientos a aguas superficiales y al Alcantarillado público

Parámetro	Unidades	Valor máximo permisible	
		Aguas superficiales	Alcantarillado Público
pH	Unidades de pH	6,00 a 9,00	5,00 a 9,00
Temperatura	°C	<40	<40
Demanda Química de Oxígeno (DQO)	mg/L O ₂	250,00	375,00
Demanda Bioquímica de Oxígeno (DBO)	mg/L O ₂	100,00	150,00
Sólidos Suspendidos Totales (SST)	mg/L	50,00	75,00
Sólidos sedimentables (SSED)	mg/L	2,00	3,00
Grasas y Aceites	mg/L	10,00	15,00
Fenoles	mg/L	0,20	0,20
Sustancias Activas de Azul de metileno (SAAM)	mg/L	Análisis y Reporte	Análisis y Reporte
Hidrocarburos Totales (HTP)	mg/L	10,00	10,00
Hidrocarburos Aromáticos Policíclicos (HAP)	mg/L	Análisis y Reporte	Análisis y Reporte
BTEX (Benceno, Tolueno, Etilbenceno y Xileno)	mg/L	Análisis y Reporte	Análisis y Reporte
Fósforo Total (P)	mg/L	Análisis y Reporte	Análisis y Reporte
Cianuro Total (CN)	mg/L	0,10	0,10
Aluminio (Al)	mg/L	3,00	3,00
Arsénico(As)	mg/L	0,10	0,10
Bario (Ba)	mg/L	1,00	1,00
Cadmio (Cd)	mg/L	0,05	0,05
Cinc (Zn)	mg/L	3,00	3,00
Cobre (Cu)	mg/L	1,00	1,00
Cromo (Cr)	mg/L	0,50	0,50

TRATAMIENTO DE AGUAS RESIDUALES

Parámetro	Unidades	Valor máximo permisible	
		Aguas superficiales	Alcantarillado Público
Estaño (Sn)	mg/L	2,00	2,00
Hierro (Fe)	mg/L	3,00	3,00
Mercurio (Hg)	mg/L	0,01	0,01
Níquel (Ni)	mg/L	0,50	0,50
Plata (Hg)	mg/L	0,20	0,20
Plomo (Pb)	mg/L	0,20	0,20
Acidez Total	mg/L	Análisis y Reporte	Análisis y Reporte
Alcalinidad Total	mg/L	Análisis y Reporte	Análisis y Reporte
Dureza Cálrica	mg/L	Análisis y Reporte	Análisis y Reporte
Dureza Total	mg/L	Análisis y Reporte	Análisis y Reporte
Color Real (medidas de absorbancia a las siguientes longitudes de onda: 436nm, 525nm y 620nm)	mg/L	Análisis y Reporte	Análisis y Reporte

Nota: Valores máximos permisibles para la actividad “tratamiento y revestimiento de metales” con vertimiento al Alcantarillado Público y a cuerpos de agua superficial.

Fuente: Elaboración propia con base en la Resolución 0631(2015)

Alternativas de tratamiento de aguas residuales

La identificación de la tecnología adecuada para el tratamiento de aguas residuales industriales dependerá de la composición del agua, concentración de los contaminantes y calidad del agua deseada a obtener. De acuerdo con las características propias de la industria galvánica se hace necesario la identificación de alternativas eficientes para la remoción de metales y cianuro.

TRATAMIENTO DE AGUAS RESIDUALES

Tabla 5

Ventajas y desventajas de las tecnologías de tratamiento de aguas residuales

Tecnologías de tratamiento	Ventajas	Desventajas
Oxidación con permanganato potásico	<ul style="list-style-type: none"> • La cinética de degradación de todas las especies cianuradas es rápida.^a • Se obtienen tasas de degradación de cianuro libre cercanas al 100% en presencia de exceso de permanganato potásico.^a • Rápida y completa descomposición de cianuros, cianatos y tiocianatos.^a • De fácil manejo en preparación de soluciones y dosificación (se administra normalmente en estado sólido).^a • Costo bajo ^a • En la oxidación del cianuro se obtienen especies menos tóxicas como lo son cianatos, nitratos, amonio y nitritos ^a • Se detecta la oxidación de especies intermedias de oxidación del cianuro como lo son nitritos y nitratos ^a • Permite la oxidación a concentraciones altas de cianuro.^b 	<ul style="list-style-type: none"> • Se deben emplear otros procesos que permita alcanzar la depuración total de especies cianuradas.^b • Su oxidación depende del contenido de tiocianato, pues este hace que resulte menor su reactividad.^b
Procesos avanzados de oxidación (PAO)	<ul style="list-style-type: none"> • Eficiencias de remoción cercanas al 100% después de 4 horas de irradiación con el uso de lámparas UV a 254nm ^a • Permiten lograr también desinfección del agua ^a • Con el uso de TiO₂ se mejora el % de cianuro degradado ^a • Buenos rendimientos de degradación de contaminantes ^a • Remoción de metales y contaminantes orgánicos simultáneamente, Menor peligro por productos ^d 	<ul style="list-style-type: none"> • Al necesitar el empleo de lámparas el proceso es más costoso. ^a • los reactivos son costosos ^a • Se obtienen mayores cantidades de catión amonio ^a • Aumenta la toxicidad final en función de la composición de las aguas residuales. ^a

TRATAMIENTO DE AGUAS RESIDUALES

Tecnologías de tratamiento	Ventajas	Desventajas
Peróxido de hidrogeno	<ul style="list-style-type: none"> • Este proceso es capaz de lograr bajos niveles de cianuro y metales, con una remoción hasta de un 99%.^a • Alternativa efectiva para degradar cianuros libres y complejados.^a 	<ul style="list-style-type: none"> • Se requiere la presencia de catalizadores, como: cobre, vanadio soluble, tungsteno, plata en concentraciones de 5 a 50ppm.^a • Esta técnica es empleada para soluciones que contengan niveles iniciales de cianuro bajos.^a • Puede reaccionar con sulfuros en la fase sólida, lo que genera un mayor consumo de reactivos.^a
Precipitación química	<ul style="list-style-type: none"> • Funciona eficazmente en altas concentraciones de metales.^d • Equipo con bajo costo.^d • La operación de la técnica es segura.^d • Es una técnica económica y selectiva en cuanto a su proceso.^e 	<ul style="list-style-type: none"> • Produce gran cantidad de lodos.^d • La precipitación es lenta.^d • Requiere de gran cantidad de químicos.^d • Sensible a condiciones de bajo pH, y presencia de otros iones.^f • Precipitación deficiente a concentración muy baja del analito.^f
Intercambio iónico	<ul style="list-style-type: none"> • Eficaz remoción de iones metálicos que se encuentran en concentraciones bajas^d • La producción de lodos por intercambio iónico es mucho más baja.^e • Rápida cinética.^f 	<ul style="list-style-type: none"> • No permite el manejo de soluciones con alta concentración de metales, presencia de sustancias orgánicas y otros solidos presentes en el agua.^d • Elevados costos de operación^f Generación de contaminantes secundarios en el proceso de regeneración.^f
Membranas de filtración	<ul style="list-style-type: none"> • Permite remover sólidos suspendidos, compuestos orgánicos e inorgánicos.^d • Permite remover varios tamaños de partícula.^d • Requerimiento de poco espacio, baja presión, alta selectividad en la separación.^d 	<ul style="list-style-type: none"> • Biodegradación del material de la membrana.^d • Alto costo de operación debido al taponamiento de las membranas.^d • Generación de grandes cantidades de lodos que

TRATAMIENTO DE AGUAS RESIDUALES

Tecnologías de tratamiento	Ventajas	Desventajas
	<ul style="list-style-type: none"> • Altas eficiencias de remoción y es fácil de operar.^e 	<ul style="list-style-type: none"> • contienen metales.^e
Coagulación-floculación	<ul style="list-style-type: none"> • Fácil de emplear y presenta un bajo costo.^e • Permite ser usada en varios tipos de agua.^e 	<ul style="list-style-type: none"> • Alta generación de lodos.^e • Permite remover la turbiedad y el color.^e
Electrocoagulación	<ul style="list-style-type: none"> • Permite la reducción de una variedad de contaminantes, como: grasas, metales pesados, aceites, fosfatos, cianuros, materia orgánica.^f • contiene menor cantidad de sólidos disueltos que aquellas tratadas con productos químicos.^f • Los costos de tratamiento de estos efluentes disminuyen en el caso de ser reusados.^f • El proceso permite eliminar partículas coloidales de menor tamaño.^f • No requiere la adición de agentes químicos.^f 	<ul style="list-style-type: none"> • Requiere reponer los electrodos de sacrificio, ya que se disuelven en la corriente residual como resultado de la oxidación.^f • La eficiencia del proceso disminuye a causa de la formación de una capa de óxido impidiendo el paso de la corriente eléctrica.^f • Este tratamiento se puede volver costoso dependiendo del costo de la energía en la región donde se realiza.^f • Requiere de una alta conductividad en las aguas residuales.^f • El tratamiento puede ser costoso en regiones donde el costo de la energía eléctrica es alta.^f

Nota. ^aViña (2019). ^bFernandez et al (2021). ^cBarrientos y Medina (2018). ^dSarria et al (2020). ^ePabon et al (2020). ^fDel Consuelo y Peña (2021).

TRATAMIENTO DE AGUAS RESIDUALES

CONCLUSIONES

De acuerdo con la revisión, se identifica que en Colombia se establece mediante la Resolución 0631 de 2015, los límites máximos permisibles para los parámetros a medir para la actividad de Tratamiento y Revestimiento de metales con vertimiento a cuerpos de agua superficial y al Alcantarillado Público, en la cual se evidencia que las variables para los cuerpos de agua son más restrictivas. Así mismo, se observa que la mayoría de las variables son metales pesados ya que es característico de los efluentes de la industria galvánica. Algunas variables no presentan un límite máximo permisible, sin embargo, deben ser analizadas y reportadas.

Por otra parte, se identifican las tecnologías de tratamiento mas estudiadas en la bibliografía, tales como oxidación con permanganato potásico, procesos avanzados de oxidación, peróxido de hidrogeno, precipitación química, intercambio iónico, membranas de filtración, coagulación-floculación y electrocoagulación. Hay que tener en cuenta, que la selección de la alternativa mas adecuada dependerá de factores como concentración de los contaminantes, calidad de agua a obtener, costos disponibles para el tratamiento, espacio disponible para la instalación de equipos, condiciones iniciales del efluente que puedan afectar la eficiencia del tratamiento y los costos disponibles para el mantenimiento.

Por último, se debe tener en cuenta que, según los contaminantes y los niveles de concentración a remover, es posible combinar alternativas durante el proceso de tratamiento, con el fin de lograr la eliminación completa de compuestos orgánicos, sólidos, metales pesados, compuestos inorgánicos, entre otros.

TRATAMIENTO DE AGUAS RESIDUALES

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Barrientos, J. C., Medina, J. D. (2018). Estudio de la reacción de oxidación química de Cianuro para el tratamiento de aguas residuales de una Empresa Minera. *Universidad EAFIT*, 1-18. https://repository.eafit.edu.co/bitstream/handle/10784/13131/JuanCamilo_BarrientosLezcano_2018.pdf?sequence=2&isAllowed=y

Decreto 1076 de 2015. [Sector Ambiente y Desarrollo Sostenible]. Por medio del cual se expide el Decreto Único Reglamentario del Sector Ambiente y Desarrollo Sostenible. 26 de marzo de 2015. D.O. No. 49523.

Del Consuelo Ronquillo Castro, S. M., & Peña Murillo, S. E. (2021). *Tecnologías Para Tratamiento de Efluentes Industriales REMOCIÓN DEL CROMO (VI)*. Savez Editorial. <https://doi.org/10.53887/se.vi.51>

Estrada Montoya, C. C. (2019). *Evaluación de la remoción de cianuro y metales pesados en efluentes líquidos provenientes del beneficio de oro de la pequeña minería, mediante adsorción con carbón activado y peróxido de hidrógeno*. [Tesis de Maestría, Universidad de Manizales]. Repositorio Universidad de Manizales

Fernández Pérez, B., Viña Mediavilla, J. J., Ayala Espina, J., & O. Ania, C. (2021). Eficacia del permanganato potásico en la degradación de cianuro y tiocianato en aguas residuales mineras. *Revista Internacional de Contaminación Ambiental*, 37, 109–117. <https://doi.org/10.20937/rica.53701>

FUNDES La red de Soluciones Empresariales y Ministerio del Medio Ambiente. (s.f.). *Guía de Buenas Prácticas para el Sector Galvanotécnica*.

TRATAMIENTO DE AGUAS RESIDUALES

<https://justiciaambientalcolombia.org/wp-content/uploads/2012/09/guc3ada-buenas-prc3a1cticas-galvanotecnia.pdf>

Garzón Gutiérrez, M. J. (2021). *Estudio de la bioadsorción de níquel con adsorbente de maíz en aguas residuales provenientes de una industria de galvanotécnica*. [Tesis de maestría, Universidad de Cundinamarca]. Archivo Digital.

<https://repositorio.ucundinamarca.edu.co/handle/20.500.12558/3353>

Ibarra Rodríguez, D. (2020) Análisis integral y optimización de un proceso de floculación- coagulación empleando pectina de nopal para el tratamiento de aguas contaminadas con metales de la industria galvanoplastia [Tesis de Doctorado, Centro de investigación y desarrollo tecnológico en electroquímica, s.c]. Repositorio CIDETEQ.

Instituto Nacional de Salud. (2019). Tecnologías para la recuperación de agua contaminada con metales pesados: plomo, cadmio, mercurio y arsénico [Boletín Tecnológico No. 3].

<https://web.ins.gob.pe/sites/default/files/Archivos/ogitt/cati/3%20BOLET%20C3%8DN%20T%20C3%89CNOLOGICAS%20N-3%202019.pdf>

Instituto Nacional de Salud. (2017). Informe Quincenal Epidemiológico Nacional. <https://web.ins.gob.pe/sites/default/files/Archivos/ogitt/cati/3%20BOLET%20C3%8DN%20T%20C3%89CNOLOGICAS%20N-3%202019.pdf>

León Vilela, E., y Aramburú Rojas, V. (2021). Aplicación de la electrocoagulación en la eliminación de los metales pesados en los efluentes galvánicos. *Revista Del Instituto De investigación De La Facultad De Minas, Metalurgia Y Ciencias geográficas*, 24(48), 109–115.

<https://doi.org/10.15381/iigeo.v24i48.19828>.

TRATAMIENTO DE AGUAS RESIDUALES

Ministerio de Salud y Protección Social Dirección de Promoción y Prevención Subdirección Ambiental. (2015). *Guía para el desarrollo de actividades de promoción y prevención en la industria de galvanoplastia*. Red unalmed para la sostenibilidad ambiental. Universidad Nacional de Colombia.

[https://idea.medellin.unal.edu.co/images/NOTICIAS/Diagnostico de Proceso y Caracterizacion de Residuos en la Industria de Recubrimientos Metalicos.pdf](https://idea.medellin.unal.edu.co/images/NOTICIAS/Diagnostico_de_Proceso_y_Caracterizacion_de_Residuos_en_la_Industria_de_Recubrimientos_Metalicos.pdf)

Ocampo, L., Gallego, D., Carvajal, E., Arroyave, D., Suarez, P., Diaz, A., Toro, L., Pizarro, S. y Hormaza, A.,(2019). *Diagnostico de proceso y caracterización de residuos en la industria de recubrimientos metalicos en el Sur del Valle de Aburrá*. Red unalmed para la sostenibilidad ambiental. Universidad Nacional de Colombia.

[https://idea.medellin.unal.edu.co/images/NOTICIAS/Diagnostico de Proceso y Caracterizacion de Residuos en la Industria de Recubrimientos Metalicos.pdf](https://idea.medellin.unal.edu.co/images/NOTICIAS/Diagnostico_de_Proceso_y_Caracterizacion_de_Residuos_en_la_Industria_de_Recubrimientos_Metalicos.pdf)

Orarbo Observatorio Regional Ambiental y de Desarrollo Sostenible del Rio Bogotá. (2017). *Vertimientos de Agua Residual Identificados en la Cuenca del Rio Bogotá (VARRB)*. <https://orarbo.gov.co/es/indicadores?id=1364&v=1>

Pabón, S. E., Benítez, R., Sarria, R. A., y Gallo, J. A.. (2020). Contaminación del agua por metales pesados, métodos de análisis y tecnologías de remoción. Una revisión. *Entre Ciencia e Ingeniería*, 14(27), 9-18. Recuperado de: <https://doi.org/10.31908/19098367.0001>

Quintero Cortés, L.F., Virguez Huertas, I. L. (2017). *Diagnóstico de peligros en los procesos químicos de la empresa de galvanoplastia “nicrozinc ltda.”, con base en la norma gtc-45 para establecer protocolos de seguridad y emergencia* [Tesis de especialización, Universidad Distrital Francisco José de Caldas]. Repositorio Institucional Universidad Distrital.

TRATAMIENTO DE AGUAS RESIDUALES

<https://repository.udistrital.edu.co/bitstream/handle/11349/7261/QuinteroCort%c3%a9sLuisaFernanda2017.pdf?sequence=1&isAllowed=y>

Resolución 0631 de 2015. [Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible]. Por la cual se establecen los parámetros y los valores límites máximos permisibles en los vertimientos puntuales a cuerpos de aguas superficiales y a los sistemas de alcantarillado público y se dictan otras disposiciones. 17 de marzo de 2015. D.O. No. 49486.

Sarria Villa, R.A., Gallo Corredor, J.A., Benítez Benítez, R. (2020). Tecnologías para remover metales pesados presentes en aguas. Caso Cromo y Mercurio. *Journal de Ciencia e Ingeniería*, 12 (94-109). DOI: <https://doi.org/10.46571/JCI.2020.1.8>

Viña Mediavilla, J. J. (2019). *Oxidación química y fotoxidación de especies cianuradas presentes en aguas residuales de origen industrial*. [Tesis de Doctorado, Universidad de Oviedo]. <https://digital.csic.es/handle/10261/244338>

Naciones Unidas. (17 de mayo de 2022). *Objetivo 6: Garantizarla disponibilidad de agua y su gestión sostenible y el saneamiento para todos*. <https://www.un.org/sustainabledevelopment/es/water-and-sanitation/>