

Ensayo de jarras para el control del proceso de coagulación en el tratamiento de aguas residuales industriales

Jar test for the control of coagulation process in industrial wastewater treatment

Diana Marcela Fúquene¹, Andrea Viviana Yate²

¹ Candidato a Doctor en Proyectos, ² Magíster en Ingeniería Química.

^{1,2} Docente Escuela de Ciencias Agrícolas, Pecuarias y del Medio Ambiente, Universidad Nacional Abierta y a Distancia – UNAD. Grupo de investigación en Estudios Ambientales Aplicados – GEAA, Bogotá – Colombia.

^{1,2} geaa.unad@gmail.com

Resumen

En este documento se presentan las características teóricas y prácticas para el desarrollo de las pruebas de tratabilidad o ensayo de jarras en muestras de aguas residuales de origen industrial, con el fin de simular el proceso de coagulación a nivel laboratorio. Esto permite identificar cual es el coagulante y dosis adecuada a emplear, para clarificar el agua y obtener una remoción de los sólidos suspendidos y en suspensión del agua cruda, quedando a punto para continuar con los otros procesos de tratamiento establecidos en la Planta de tratamiento de aguas residuales (PTAR).

Palabras clave: Agua residual industrial; coagulación; coagulantes; floculación; test de jarras.



Resumen gráfico

Introducción

Tal como lo indica Quevedo, las aguas residuales industriales son efluentes generados por el procesamiento, manipulación y transformación de los recursos en la producción de bienes y servicios varios, como en la ganadería bovina (Corredor

Camargo, Castro Escobar, Páez Barón, & Fonseca Carreño, 2017), que deterioran sus condiciones y características. Para poder verter nuevamente estos efluentes a los cuerpos de agua se debe realizar un tratamiento con el objetivo de remover y reducir los contaminantes e impurezas del efluente y de ésta forma cumplir la normatividad vigente (Tafur & Quevedo, 2014).

DOI: <https://doi.org/10.22490/ECAPMA.2771>

El tratamiento a utilizar es una mezcla de procesos unitarios que se diseñan con el fin de lograr un objetivo final, que puede ser; un aprovechamiento, un vertimiento al alcantarillado, un vertimiento a un cuerpo de agua o un retorno al proceso productivo. Para lograr estos propósitos se recomienda tener en cuenta las pautas de selección de procesos de tratamiento de aguas residuales presentadas por Romero, tales como (Romero Rojas, 2004):

- Características del agua cruda.
- Calidad requerida del efluente.
- Disponibilidad del terreno
- Costos de construcción y operación del sistema de tratamiento.
- Confiabilidad del sistema de tratamiento.
- Facilidad de optimización del proceso para satisfacer requerimientos futuros más exigentes.

La mejor alternativa de tratamiento se selecciona con base en el estudio individual de cada caso, de acuerdo con las eficiencias de remoción requeridas y con los costos de cada una de las posibles soluciones técnicas (Romero Rojas, 2004).

El tratamiento convencional de las aguas residuales incluye:

Pretratamiento: Hace referencia al transporte del agua residual a la planta de tratamiento e incluye procesos como desbaste, tamizado, desarenado, homogenizado y desengrase. En esta etapa se mide y controla el caudal de ingreso del agua a la planta y se remueven los sólidos flotantes de mayor tamaño.

Tratamiento primario: Incluye los procesos de decantación, flotación, clarificación, filtración simple y neutralización. En esta etapa se incluye la floculación y coagulación, y su principal objetivo es eliminar los sólidos en suspensión.

Tratamiento biológico o secundario: Se caracteriza por el uso de microorganismos (bacterias y protozoos) para remover los contaminantes del agua ya sea de manera aerobia o anaerobia, su objetivo principal es eliminar la materia orgánica mediante un proceso biológico de oxidación efectuado por los microorganismos presentes en el agua residual.

Tratamiento terciario: Su principal objetivo es eliminar la carga orgánica y los nutrientes; dentro de los procesos se encuentran el intercambio iónico, la adsorción, la micro y ultrafiltración, la osmosis inversa, la desinfección, la oxidación avanzada y las membranas. Por ejemplo, en la desinfección se usa cloro para la eliminación de microorganismos. También suprime algunos contaminantes específicos como los fosfatos.

Para el caso específico del ensayo de jarras se revisa a detalle el proceso de coagulación de las aguas residuales industriales, que es el que facilita la remoción de los sólidos sedimentables y las partículas coloidales. La coagulación se define como un proceso de desestabilización química de las partículas coloidales que se produce al neutralizar las fuerzas que las mantienen separadas, por medio de la adición de coagulantes químicos y la adición de energía de mezclado (Andía, 2000). Es un proceso fundamental en la etapa de tratamiento primario de las aguas residuales, específicamente en la clarificación en donde se remueven la mayor parte de sólidos en suspensión. El proceso de coagulación también se usa para remover la turbiedad orgánica e inorgánica, el color verdadero y aparente, algunos microorganismos patógenos y algunas sustancias productoras de olor y sabor (Restrepo, 2009).

Existe una fuerza de repulsión entre las partículas contaminantes del agua, debida a las cargas eléctricas que poseen, por lo cual se mantienen suspendidas en el agua y no se sedimentan; el fenómeno de desestabilización de dichas partículas o coagulación, se realiza mediante la adición de coloides de carga opuesta a la de las partículas contaminantes, que neutralizan la carga, reduciendo la repulsión de las partículas a tal punto, que chocando con cierta velocidad pueden unirse y flocular (Restrepo, 2009).

Los coloides son suspensiones estables que no se sedimentan de forma natural, siendo los principales responsables de la turbiedad y el color en el agua; presentan un diámetro entre 1 y 1000 milimicrómetros (Andía, 2000). Los coloides pueden ser hidrófobos si repelen el agua, principalmente se refiere a las partículas inorgánicas, o hidrófilos si tienen afinidad con ella, los cuales por lo general son la materia orgánica presente en el agua. Los primeros son importantes en el tratamiento de aguas, ya que son inestables con respecto a la formación de cristales no coloidales; los segundos componen soluciones verdaderas y abarcan polímeros, proteínas, almidones y otras macromoléculas. En cuanto a la cinética de coagulación algunos son termoestables y otros inestables, en estos últimos la coagulación es significativa. (De Vargas, 2004).

Existen dos grandes fuerzas a las que se ven sometidas las partículas coloidales; por un lado, la fuerza de atracción de Van der Waals que se produce por el movimiento continuo de las partículas y como su nombre lo indica generan atracción entre ellas y por el otro las fuerzas de repulsión electrostáticas que impiden la aglomeración de las partículas, que normalmente se repelen entre ellas por tener la misma carga (Andía, 2000).

Las partículas coloidales que presentan carga negativa en el agua se repelen entre ellas, por lo tanto, es necesaria la adición de agentes coagulantes que desestabilicen los coloides y generen la atracción entre ellos, a través de diferentes mecanismos fisicoquímicos, dentro de los que se destacan (Barrenechea, 2004):

Compresión de la doble capa: Como la superficie de las partículas coloidales es negativa atrae un cúmulo de iones positivos en la región interfaz (sólido- líquido), que junto con la carga negativa forman la "doble capa". La repulsión eléctrica de las partículas coloidales disminuye si se incrementan los iones de carga opuesta en la solución; al introducir un electrolito que no reacciona en el agua, aumenta la densidad de las cargas y disminuye la esfera de influencia de las partículas con lo cual se logra la coagulación por compresión de la doble capa, es decir que la desestabilización de un coloide por un electrolito indiferente ocurre cuando los iones de igual carga son repelidos y los de carga opuesta son atraídos por los coloides.

Adsorción: Se da cuando los coloides de signos contrarios se mezclan en el agua, es decir cuando los iones del coagulante con carga opuesta se adsorben por la partícula coloidal, logrando neutralizar las cargas repulsivas y facilitando la formación de precipitados. Para que la eficiencia de este mecanismo sea óptima debe haber un pH ácido y bajas concentraciones del coagulante.

Captura por barrido: Se adiciona coagulante en una concentración tan alta que impide que se solubilice en el agua, haciendo que se formen precipitados y se originen flóculos que atrapan las partículas suspendidas y facilitan su decantación.

Adsorción y enlace de puente interpartícula: Es la reacción entre el coagulante y un sector de la zona superficial del coloide. Las moléculas largas del coagulante pueden adsorber partículas en una de sus extremidades, quedando libre el resto de zona superficial para adsorber otras partículas coloidales.

Los coagulantes son productos que reaccionan químicamente con los componentes de agua, especialmente con la alcalinidad formando un precipitado voluminoso y absorbente. Los coagulantes desestabilizan las partículas suspendidas presentes en el agua que tienen carga negativa por neutralización de las cargas coloidales, es decir que deben ser iones positivos (Díaz Claros, 2014). Los coagulantes más usados son sulfato de aluminio, aluminato de sodio, cloruro de aluminio, cloruro férrico, sulfato férrico, sulfato ferroso y los polielectrolitos como ayudantes de floculación (Andía, 2000).

El uso de estos coagulantes convencionales derivados de sales de hierro y aluminio se ha cuestionado en las últimas décadas debido, entre otras cosas, a la dificultad técnica para estabilizar el pH óptimo de coagulación, la necesidad de altas cantidades de producto para lograr resultados

adecuados y su relación con la aparición de enfermedades neurodegenerativas como el Alzheimer y el cáncer; además estas sales tienen efectos adversos sobre el medio ambiente, para el caso del aluminio, en altas concentraciones genera problemas de acidificación, además se bioacumula en las plantas y causa problemas en la salud de los animales que las consumen; el hierro por su parte es un elemento persistente en los ecosistemas (Cogollo F, 2011)

De forma general los coagulantes se clasifican en tres tipos (Tafur & Quevedo, 2014):

Coagulantes a base de sales metálicas: Son los usados de forma convencional en los procesos de tratamiento de aguas residuales domésticas e industriales. Dentro de los coagulantes de este tipo se encuentran los compuestos a base de sales de hierro y aluminio.

Coagulantes a base de polímeros sintéticos: Estos compuestos tienen alto peso molecular y aumentan la viscosidad de la solución; se utilizan como productos complementarios de los coagulantes a base de sales metálicas en la neutralización de partículas coloidales.

Coagulantes de origen natural: Son coagulantes alternativos, derivados de productos orgánicos que pueden presentar rendimientos iguales o superiores a los de los coagulantes convencionales, dentro de este tipo de coagulantes se encuentran los almidones y polisacáridos naturales como la celulosa, las semillas de moringa (Duran, Roa, Coronel, & Alvarado, 2017), las plantas de cardón guajiro (Dearmas Duarte & Ramírez Hernández, 2015) y el quitosano.

Los coagulantes de origen natural presentan ventajas significativas con respecto a los coagulantes convencionales, dentro de las que se destacan: (Servyeco, s.f)

- Sus características de biodegradabilidad que hacen que sea una alternativa amigable con el medio ambiente.
- Su carácter orgánico que minimiza la posible modificación del pH y la conductividad en el agua ya que no consumen alcalinidad del medio.
- La eliminación total del incremento de sales en el agua.
- Una mayor eficiencia traducida en dosis bajas de coagulante que consiguen aumentar la velocidad de decantación, disminuir los tiempos de coagulación y mejorar la densidad del coágulo reduciendo de manera significativa la cantidad de floculante.
- Presenta ventajas económicas relacionadas con la reducción de costes asociados al mantenimiento de las instalaciones debido a que se reduce significativamente la corrosión que producen las sales usadas convencionalmente; por su eficiencia también se reduce o elimina por completo el uso de floculantes lo cual se traduce en menores costos.

Existen diferentes variables que influyen en la optimización del proceso de coagulación, dentro de las cuales se destaca:

pH: Es la variable más influyente en el proceso de coagulación, dado que si este se desarrolla fuera del rango de pH se disminuye la solubilidad del coagulante en el agua y se van a requerir concentraciones más altas del mismo, además tomará mayor tiempo para la formación del floculo (Dominguez Amorocho, 2010).

Turbiedad: La concentración de coagulante aumenta con la turbiedad del agua y para cada turbiedad hay una dosis óptima de coagulante, sin embargo, si la turbiedad es muy alta las dosis de coagulante disminuyen, pues es de esperar colisión entre los coloides, por otra parte, si la turbiedad es muy baja, se requieren mayores dosis de coagulante pues hay menor probabilidad de choque entre partículas (Dominguez Amorocho, 2010).

Agitación y mezcla: La eficiencia del proceso está determinada por la agitación de la mezcla de agua con el coagulante, que asegura que la concentración de este sea uniforme en toda la solución; la intensidad y tiempo de mezcla determinan la distribución adecuada de coagulante (Tafur & Quevedo, 2014).

Tamaño de las partículas: Si las partículas coloidales son muy pequeñas se requiere la adición de mayor cantidad de coagulante, mientras que si las partículas son muy grandes se dificulta la formación del floculo (Restrepo, 2009).

Temperatura del agua: La variación de la temperatura afecta la densidad del agua, un aumento en este parámetro modifica la energía cinética de las partículas en suspensión, por lo que el proceso de coagulación es más lento en temperaturas elevadas; de igual forma bajas temperaturas ocasionan un aumento en la viscosidad del agua y por consiguiente dificulta la sedimentación del floculo (Gomez Puentes, 2005).

Dosis de Coagulante: La dosis óptima de coagulante se determina mediante test de jarras (Ensayo que constituye el método más sencillo para evaluar el acondicionamiento químico y es el mismo que se usa para ensayos convencionales de coagulación (Romero Rojas, Tratamiento de aguas residuales. Teoría y principios de diseño, 2004)). Es de vital importancia considerando que cantidades muy pequeñas de coagulante impiden la neutralización total de la carga del coloide por lo que la formación de flóculos es mínima; mientras que dosis muy altas de coagulante invierten la carga de las partículas coloidales haciendo que se formen gran cantidad de flóculos pequeños que se tardan demasiado en sedimentar (Tafur & Quevedo, 2014).

Materiales y métodos

De acuerdo con Romero, el ensayo de jarras es uno de los más importantes en el control del proceso de coagulación química de aguas. Este proceso requiere como datos previos mínimos los valores de pH, turbiedad, color y alcalinidad del agua cruda. (Romero Rojas, 2002). En la prueba de jarras se utilizan variaciones en la dosis del coagulante y/o floculante en cada jarra (generalmente se usan equipos de seis (6) jarras), permitiendo la reducción de los coloides en suspensión y materia orgánica a través del proceso de floculación; es decir, simula los procesos unitarios de coagulación, floculación y sedimentación, permitiendo además realizar el ajuste en el pH de cada muestra hasta llegar a los valores en los que la floculación alcanza sus mejores resultados, los cuales dependerán del tipo de reactivo a utilizar, aunque generalmente se maneja un pH entre 7,3 a 7,6. (Navarro, 2015)

El principal objetivo del test de jarras es encontrar la dosis ideal para el proceso unitario que produzca la mejor calidad de agua posible a los menores costos.

Materiales:

- Coagulantes (Sal de hierro, sal de aluminio o coagulante natural)
- Floculante (Polímero catiónico o aniónico)
- Sal fuerte (Soda caustica)
- Ácido fuerte (Ácido clorhídrico)
- Pipetas de 1ml o jeringas de 1ml
- Beakers de 1 litro
- Equipo de jarras o plancha de agitación magnética
- pH metro
- Turbidímetro
- linterna, en caso de usar planchas de agitación magnética
- Elementos de protección personal como gafas, guantes de látex, bata y tapabocas

Procedimiento:

Si bien, las pruebas de jarras son ampliamente usadas, para el estudio en laboratorio se empleará una adaptación del protocolo de prácticas del curso Diseño de Plantas de Tratamiento de Aguas Residuales de la Universidad Nacional Abierta y a Distancia (Fúquene Yate, 2017)

1. Inicie la prueba de jarras, midiendo al agua residual cruda (es decir sin tratar, tal cual como se tomó de la industria) el pH, la turbiedad, el color y la alcalinidad.
2. Revise cual es el rango óptimo del pH para la aplicación del coagulante que va a trabajar. Y si es necesario ajuste el pH de toda la muestra del agua residual con la soda caustica o con el ácido clorhídrico, según corresponda.
3. Coloque un litro de la muestra a trabajar en cada uno de los beakers.
4. Defina diferentes dosis del coagulante a analizar, con el fin de establecer cuál es la dosificación de cada jarra, considerando que las cantidades deben variar en volúmenes de 0.5ml por litro de agua.
5. Programe una mezcla rápida intensa (± 100 rpm) y de corta duración, aproximadamente un minuto, después de la adición del coagulante a trabajar.
6. Programe la adición del floculante y una mezcla lenta (± 60 rpm) de aproximadamente 15 minutos, inmediatamente después del paso 5 (coloque la misma cantidad de floculante en todas las jarras iniciando con 0.5ml por litro de agua).
7. Inicie el programa secuencial y se observe el comportamiento de cada jarra.
8. Encienda la luz del equipo de jarras y deje reposar por al menos 10 minutos sin mezclar.
9. Al finalizar el tiempo de reposo, observe el volumen de lodos generados.
10. Extraiga una muestra del agua clarificada mediante la ayuda de las llaves que existen en cada jarra o con el uso de una pipeta o una jeringa.
11. Realice la medición de los parámetros del numeral 1 al agua tratada.

Conclusiones y recomendaciones

La prueba de jarras es una etapa importante en el proceso de tratamiento de aguas residuales, y requiere de especial seguimiento, ya que es una prueba de corta duración y permite mediante observación identificar el comportamiento de los coagulantes empleados, lo que complementa los resultados de medición de parámetros en cada jarra. El correcto desarrollo y cálculo de parámetros en esta prueba permite establecer la dosis óptima a usar a nivel piloto o escala real en una PTAR.

Es importante que se varíen las cantidades del coagulante en rangos de 0,5ml por cada litro de agua a tratar dejando una dosis constante del polímero de 0,5ml por cada litro de agua; ya que esto permite que la muestra no se sature.

Se recomienda realizar un muestreo de 20 litros de agua residual de origen industrial con el fin de tener la cantidad de muestra suficiente para el desarrollo de las jarras con un volumen de un litro cada una.

Literatura citada

- Andía, Y. (2000). Tratamiento de agua. Coagulación y Floculación. (SEDAPAL, Ed.) Recuperado de: <https://bit.ly/2KKb00T>
- Barrenechea, A. (2004). Tratamiento de agua para consumo humano. Capítulo 4 Coagulación. Recuperado de: <http://www.ingenieroambiental.com/4014/cuatro.pdf>
- Cogollo F, J. M. (2011). Clarificación de aguas usando coagulantes polimerizados. *DYNA*, 78 (165), 18-27. Recuperado de: <https://revistas.unal.edu.co/index.php/dyna/article/view/25636/39133>
- Corredor Camargo, E. S., Castro Escobar, E. S., Páez Barón, E. M., & Fonseca Carreño, J. A. (2017). Metodologías utilizadas para estimar el impacto de la ganadería bovina sobre el recurso hídrico. *Working Papers – Ecapma* 1(1). Recuperado de: <http://hemeroteca.unad.edu.co/index.php/workpaper/article/view/1771/2004>

- De Vargas, L. (2004). Tratamiento de agua para consumo humano. Plantas de filtración rápida. Recuperado de:
http://www.bvsde.paho.org/bvsatr/fulltext/tratamiento/manuall/tomol/ma1_tomo1_indice.pdf
- Dearmas Duarte, D., & Ramírez Hernández, L. (2015). Remoción de nutrientes mediante coagulantes naturales y químicos en planta de tratamiento de aguas residuales, Valledupar Colombia. *Revista de Investigación Agraria y Ambiental*, 6(2), 183 - 196.
[doi:https://doi.org/10.22490/21456453.1415](https://doi.org/10.22490/21456453.1415)
- Díaz Claros , J. (2014). Coagulantes- Floculantes organicos e inorganicos elaborados de plantas y del reciclaje de la chatarra para el tratamiento de aguas contaminadas. Recuperado de:
<http://www.cervantesvirtual.com/obra/coagulantes-floculantes-organicos-e-inorganicos-elaborados-de-plantas-y-del-reciclaje-de-la-chatarra-para-el-tratamiento-de-aguas-contaminadas/>
- Dominguez Amorocho, M. F. (2010). Optimización de la coagulación- floculación en la planta de tratamiento de agua potable de la sede recreacional campo alegre-Cajasan. Recuperado de:
https://repository.upb.edu.co/bitstream/handle/20.500.11912/848/digital_19174.pdf?sequence=1&isAllowed=y
- Duran, Z., Roa, R., Coronel, D., & Alvarado, A. (2017). Análisis del proceso de coagulación de un agua residual usando un coagulante natural y un coagulante químico. *Working Papers – ECAPMA*, 1 (2). Recuperado de:
<http://hemeroteca.unad.edu.co/index.php/workpaper/article/view/1821/2034>
- Fúquene Yate, D. M. (2017). Guía para el desarrollo del componente práctico curso Diseño de plantas de tratamiento de aguas residuales. Bogotá.
- Gomez Puentes, N. A. (2005). *Remoción de materia orgánica por coagulación- floculación*. (Tesis Pregrado). Universidad Nacional de Colombia Sede Manizales, Manizales. Recuperado de:
<http://www.bdigital.unal.edu.co/1214/1/nestoralejandrogomezpuentes.2005.pdf>
- Navarro, N. (2015). Ingeniería y servicios ambientales - ISA. [Mensaje en un blog] Recuperado de:
<http://www.isa.ec/index.php/va-viene/entry/prueba-de-jarras>
- Pistonesi, C., Haure, J., & D´Elmar, R. (2010). Energía a partir de las aguas residuales. Recuperado de:
http://www.edutecne.utn.edu.ar/energia_aguas_residuales/energia_aguas_residuales.pdf
- Restrepo, H. (2009). Evaluación de proceso de Coagulación- Floculación de una planta de tratamiento de agua potable. (U. N. Colombia, Ed.) Recuperado de:
http://www.bdigital.unal.edu.co/877/1/15372239_2009.pdf
- Romero Rojas, J. A. (2002). Calidad del agua. Bogotá: Escuela colombiana de ingeniería.
- Romero Rojas, J. A. (2004). Tratamiento de aguas residuales. Teoría y principios de diseño. Bogotá: Escuela colombiana de ingeniería.
- Servyeco. (s.f). Coagulantes: definición y tipos. Recuperado de:
<http://www.servyeco.com/coagulantes-definiciones-y-tipos-servyeco.html>
- Tafur, L., & Quevedo, R. (2014). Alternativa para el tratamiento de aguas residuales cromadas con quitosano extraído del exoesqueleto del camaron. Recuperado de:
<http://repository.ut.edu.co/handle/001/1250>