

## Biotempo (Lima)

ORIGINAL ARTICLE / ARTÍCULO ORIGINAL

### TREATMENT OF EFFLUENTS OF THE FOOD INDUSTRY BY COAGULATION-FLOCCULATION USING STARCH OF *SOLANUM TUBEROSUM* L. 'POTATO' AS AN ALTERNATIVE TO CONVENTIONAL HANDLING

### TRATAMIENTO DE EFLUENTES DE LA INDUSTRIA ALIMENTARIA POR COAGULACIÓN-FLOCULACIÓN UTILIZANDO ALMIDÓN DE *SOLANUM TUBEROSUM* L. 'PAPA' COMO ALTERNATIVA AL MANEJO CONVENCIONAL

Jazmin Desider Molano-Linares<sup>1</sup> & José Iannacone<sup>1,2</sup>

<sup>1</sup> Laboratorio de Parasitología. Facultad de Ciencias Biológicas. Universidad Ricardo Palma. Lima, Perú.

<sup>2</sup> Laboratorio de Ecología y biodiversidad Animal (LEBA). Facultad de Ciencias Naturales y Matemática. Universidad Nacional Federico Villarreal.

#### ABSTRACT

Treatment of industrial wastewater was evaluated through coagulation-flocculation using starch of *Solanum tuberosum* L. 'potato' as an alternative to the conventional management. Assays were performed in a laboratory scale by performing Jar Test with two coagulants: aluminum sulfate and aluminum polychloride, and two flocculants: anionic polyacrylamide and gelatinized starch, making variations in dose, concentration and speed. To determine the ideal parameters, the following response variables were used: Willcomb index, absorbance, turbidity and chemical oxygen demand. The best treatment was when using aluminum polychloride as coagulant and anionic polyacrylamide as flocculant, reaching a reduction percentage of 83.05% in chemical oxygen demand. Even then, the results suggest that anionic polyacrylamide can be replaced by starch of *S. tuberosum* when applying a primary treatment to industrial wastewater from a food company located in the district of Ate in Lima, Peru to meet the admissible values set in the Supreme Decree No. 021-009-VIVIENDA, with respect to organic matter present in wastewater.

**Keywords:** Starch – organic matter – chemical oxygen demand – industrial wastewater – jar test – turbidity – admissible values

#### RESUMEN

Se evaluó el tratamiento de efluentes de la industria alimentaria por coagulación-floculación utilizando almidón de *Solanum tuberosum* L. 'papa' como alternativa al manejo convencional. Los ensayos se realizaron a escala de laboratorio realizando la prueba de jarras con dos coagulantes: sulfato de aluminio y policloruro de aluminio, y dos floculantes:

poliacrilamida aniónica y almidón gelatinizado, con variaciones en relación a dosis, concentración y velocidad. Para determinar los parámetros ideales se utilizaron las siguientes variables respuesta: índice de Willcomb, absorbancia, turbidez y demanda química de oxígeno. El mejor tratamiento fue con el coagulante policloruro de aluminio y el floculante poliacrilamida aniónica alcanzándose un porcentaje de reducción de DQO de 83,05%. Aun así, los resultados al utilizar almidón sugieren que se puede reemplazar la poliacrilamida aniónica por el almidón de *S. tuberosum* al aplicar un tratamiento primario a un efluente industrial no doméstico de una empresa alimentaria ubicada en el distrito de Ate en la ciudad de Lima, Perú para cumplir los Valores máximos admisibles del Decreto Supremo N°021-009-Vivienda, en el aspecto de la carga orgánica presente.

**Palabras clave:** Almidón – carga orgánica – demanda química de oxígeno – efluente industrial – prueba de jarras – turbidez – valor máximo admisible

## INTRODUCCIÓN

En el Perú, donde el desarrollo industrial es vertiginoso, se nota muy claramente un crecimiento en los niveles de contaminación ambiental, dañando los ecosistemas acuáticos aledaños por la descarga de los efluentes industriales sin tratamiento previo ni control de las autoridades correspondientes (ANA; PNUMA, 2012). A pesar de la legislación existente para el control, no se ejecutan en todas las industrias por razones económicas, técnicas y administrativas, entre otras. Por ello en el Perú, en el año 2009, se definieron los Valores Máximos Admisibles (VMA) en el Decreto Supremo N°021-2009-Vivienda. Donde se describe a los VMA como la concentración de elementos, sustancias o parámetros físicos y/o químicos, que caracterizan a un efluente no doméstico que va a ser descargado a la red de alcantarillado (VMA, 2009).

Luego en el año 2011, se aprueba su reglamento en el Decreto Supremo N°003-2011-Vivienda, lo que puso en alerta a muchas industrias alimentarias, debido a que la carga orgánica permitida en sus efluentes estaría ahora limitada por 2 parámetros: la demanda química de oxígeno (DQO) y la demanda bioquímica de oxígeno (DBO<sub>5</sub>). Para la primera el valor máximo admisible es 1000 mg·L<sup>-1</sup> y para la segunda sólo 500 mg·L<sup>-1</sup>. La preocupación va enfocada en que se verían obligados a implementar un tratamiento rápido, económico y que no ocupe mucho espacio, para cumplir con estas disposiciones.

El distrito de Ate, en Lima, Perú alberca una gran variedad de industrias. Entre ellas, la industria alimentaria que produce principalmente salsa de soya (conocida como siyau). Este es un producto natural utilizado con frecuencia como sazónador en gran variedad de comidas nacionales y extranjeras; se obtiene del prensado de fermentos de soya remojados en salmuera añejados por meses. El “siyau” se elabora principalmente mediante cuatro ingredientes básicos: soja, trigo, sal y agua. Las características singulares de la salsa de soya se originan

principalmente de las proteínas contenidas en la soya. Mientras que, los carbohidratos contenidos en el trigo son el componente que da a la salsa de soya el aroma, y además el trigo le agrega la dulzura a esta salsa; la sal se disuelve en agua. Esta sal y solución de agua controla la propagación de las bacterias durante el proceso de elaboración y actúa como conservante. La fermentación de todos los ingredientes, es esencial para conferir el sabor de la salsa de soja, y se logra a través del hongo *Aspergillus* (Micheli, 1729). Así, la soya y el trigo aportan gran carga orgánica a los efluentes industriales de esta empresa. Haciendo necesaria la implementación de un tratamiento adecuado (FAO, 2011).

Un proceso de tratamiento de agua residual típico se conforma por: Pretratamiento: Pretende la eliminación de materias gruesas, cuerpos gruesos y arenosos cuya presencia en el efluente perturbaría el tratamiento total. Tratamiento primario: Consiste principalmente en la remoción de sólidos suspendidos, bien mediante sedimentación o coagulación-floculación. Seguidamente, tratamiento secundario: Su finalidad es la reducción de la materia orgánica una vez superadas las fases de pretratamiento y tratamiento primario (Valencia, 2000).

Para que la transformación biológica se haga efectiva y de manera eficiente, deben existir condiciones adecuadas para el crecimiento bacteriano, considerando temperatura (30-40°C), oxígeno disuelto, pH adecuado (6,5-8,0) y salinidad (menor a 3.000 ppm). En estos procesos, existen sustancias inhibitorias como sustancias tóxicas, metales pesados y otros como cianuros, fenoles y aceites, por este motivo es necesario evitar la presencia de éstos. Este tratamiento implica tener más espacio en planta, más mantenimiento y más monitoreo si se desea implementar. Y finalmente, tratamiento terciario: Es opcional y tiene como propósito reutilizar el agua tratada.

Los efluentes residuales, en distintas cantidades, contienen material suspendido, sólidos que pueden sedimentar en reposo o sólidos dispersados que no sedimentan con

facilidad. Una parte considerable de estos sólidos que no sedimentan pueden ser coloides. En los coloides, cada partícula se encuentra estabilizada por una serie de cargas de igual signo sobre su superficie, haciendo que se repelan dos partículas vecinas (Unda, 1976). Puesto que esto impide el choque de las partículas y que formen así masas mayores, llamadas floculos, y las partículas no sedimentan (Bourke, 2000). Las operaciones de coagulación y floculación desestabilizan los coloides y consiguen su sedimentación reduciendo de esta manera también la carga orgánica presente (Castrillón & De Los Ángeles, 2012). Esto se logra por lo general con la adición de agentes químicos y aplicando velocidad de mezclado (Ghaly *et al.*, 2006; Sánchez, 2007; Alcarraz *et al.*, 2010; Area *et al.*, 2010).

Generalmente, los coagulantes y floculantes utilizados son aditivos minerales que incluyen sales metálicas tales como cloruro de polialuminio y polímeros sintéticos, como la poliacrilamida (Godé, 1983; Leal *et al.*, 1998; Company, 2000; Salas, 2003). El uso de estas sustancias químicas puede tener varias consecuencias ambientales como el incremento en la concentración de metal en el agua, que puede tener implicaciones en la salud humana, la producción de grandes volúmenes de lodos y la dispersión de oligómeros de acrilamida que puede también ser un peligro para la salud (González, 1983). Es así como las nuevas tendencias en los procesos de coagulación-floculación aplican el uso de biopolímeros naturales como coadyuvante de coagulación por su comportamiento ecológico y bajo coste, entre ellos el almidón (Vásquez, 1994; Beltrán *et al.*, 2009; Anastasakis *et al.*, 2010; Antov *et al.*, 2010).

El almidón contiene generalmente alrededor del 20% de una sustancia soluble en agua llamada amilosa y el 80% de una insoluble conocida como amilopectina. Ambas fracciones corresponden a dos carbohidratos diferentes, de peso molecular elevado. Tanto la amilosa como la amilopectina están constituidas por unidades de D-(+)-glucosa, pero difieren en tamaño y forma (Järnström *et al.*, 1995; Dogu & Arol, 2004; Flores *et al.*, 2004; Mantilla, 2013; Rincón *et al.*, 2014; Alatrística *et al.*, 2015).

La hipótesis de la presente investigación fue la siguiente: el almidón de papa es igual de eficiente que la poliacrilamida aniónica como floculante en el tratamiento primario de los efluentes de una industria alimentaria.

El objetivo principal de la presente investigación es proponer un tratamiento de efluentes de la industria alimentaria por coagulación-floculación utilizando

almidón de *Solanum tuberosum* L. 'papa' como alternativa al manejo convencional. De igual forma se determinaron los parámetros óptimos en la prueba de jarras utilizando como coagulante sulfato de aluminio y como floculante poliacridamida aniónica, se establecieron los parámetros óptimos en la prueba de jarras utilizando como coagulante policloruro de aluminio y como floculante poliacridamida aniónica, se replicaron estos parámetros en la prueba de jarras utilizando como coagulantes sulfato de aluminio y policloruro de aluminio con el floculante orgánico almidón *S. tuberosum* por separado, se calculó la absorbancia a diferentes longitudes de onda y se relacionó los datos con unidades nefelométricas de turbidez y así se determinó la longitud de onda adecuada para determinar la turbidez, se utilizó las unidades nefelométricas de turbidez para relacionar la cantidad de carga orgánica presente en el efluente como demanda química de oxígeno, y se determinó la eficiencia del almidón como floculante ante la poliacridamida aniónica.

## MATERIALES Y MÉTODOS

Lugar de ejecución: Laboratorio de Investigación y Desarrollo de la empresa patrocinadora. Ubicada en el distrito de Ate en la ciudad de Lima, Perú.

Tipo de investigación: La investigación fue de tipo básica, prospectiva y experimental donde los elementos fueron manipulados, como la dosis de coagulante agregado, las revoluciones por min para la coagulación, la dosis del floculante y las revoluciones por min para la floculación.

Operacionalización de variables: Como se observa en la tabla 1, no se está considerando la demanda bioquímica de oxígeno (DBO<sub>5</sub>) debido a que este valor mantiene una relación directamente proporcional con la DQO donde, la DBO<sub>5</sub> siempre es menor a la DQO, ya que la DQO es la cantidad de oxígeno necesaria para oxidar toda la materia orgánica y oxidable presente en un agua residual. Es por tanto una medida representativa de la contaminación orgánica de un efluente siendo un parámetro a controlar dentro de las distintas normativas de vertidos y que nos da una idea muy real del grado de toxicidad del vertido. Por su lado, la DBO<sub>5</sub> es la cantidad de oxígeno que necesitan los microorganismos para degradar la materia orgánica biodegradable existente en un agua residual. Es por tanto una medida del componente orgánico que puede ser degradado mediante procesos biológicos. Se puede decir por tanto que la DBO<sub>5</sub> representa la cantidad de materia orgánica biodegradable. Mientras que, la DQO representa tanto la materia orgánica biodegradable como la no biodegradable.

**Tabla 1.** Operacionalización de las variables involucradas en el tratamiento de efluentes de la industria alimentaria por coagulación- floculación utilizando almidón de *Solanum tuberosum* como alternativa al manejo convencional.

Tipo de variables	Variables	Unidades	Definición
Intervinientes	pH	0 – 14	Concentración de protones H+ de la muestra
	Temperatura	°C	Grados centígrados de la muestra
Independientes	Tiempo de coagulación		Tiempo de agitación rápida en el cual el coagulante entra en contacto con la muestra: 1 min
	Tiempo de floculación	Minutos (min)	Tiempo de agitación lenta en el cual el floculante reacciona con el coagulante en la muestra: 20 min
	Tiempo de sedimentación		Tiempo en el cual los flocs formados, después de la coagulación-floculación, sedimentan: 15 min
	Tipo de coagulante	-	Tipo de coagulante: sulfato de aluminio y policloruro de aluminio
	Dosis de coagulante	mg·L <sup>-1</sup>	Cantidad de coagulante (mg) agregado a la muestra (L)
	Velocidad de coagulación	Revoluciones por minuto (rpm)	Revoluciones por minuto para la agitación rápida de la prueba de jarras: 160 ó 210
	Tipo floculante	-	Tipo de floculante: poliacrilamida aniónica o almidón gelatinizado
	Velocidad de floculación	Revoluciones por minuto (rpm)	Revoluciones por minuto para la agitación lenta de la prueba de jarras: 40 ó 75
	Dosis de floculante	mg·L <sup>-1</sup>	Cantidad de floculante (mg) agregado a la muestra (L)
	Dependientes	Índice de Willcomb	0 – 10
Absorbancia		-	Relación numérica entre la densidad de luz que incide sobre la muestra y la intensidad de la misma luz que sale la muestra
Turbidez		Unidades nefelométricas de turbidez (NTU)	Expresión de la propiedad óptica de una muestra, que origina que al pasar un haz de luz a través de ella, la luz se disperse y se absorba en vez de transmitirse en línea recta
DQO		mg·L <sup>-1</sup>	Concentración de la masa de oxígeno equivalente a la cantidad de dicromato consumida por la materia disuelta y suspendida cuando una muestra de agua se trata con este oxidante bajo condiciones definidas

Tipo de muestra: La industria de la cual se extrajo la muestra fue de tipo alimentaria, ubicada en el distrito de Ate, ciudad de Lima, Perú. Su principal producto es la salsa de soya “siyau”, la cual se obtenía por fermentación natural (hidrólisis enzimática fúngica) de soya y trigo en salmuera (sal y agua) para formar un producto de consistencia líquida, homogénea de color oscuro brillante con sabor salado y aroma característico. Los ingredientes involucrados en el proceso son: agua, soya, trigo, sal, azúcar, color caramelo (E150) y benzoato de sodio (E211). También se fabricaban otros productos como: Vinagre, Salsa Wantan, Salsa Mensi, Ajoikion, Shoyu y pastas a base de soya fermentada. Por otro lado, la muestra de efluente industrial, aparte de contener alta carga orgánica por la materia prima que se utilizaba en el proceso de producción, también contenía los residuos de los productos de limpieza que se utilizaban para limpiar los pisos, paredes y equipos, como son detergentes industriales y sanitizantes. En esta investigación se trabajó exclusivamente con el agua residual no doméstica proveniente de los procesos de la actividad industrial.

Caracterización del agua residual no doméstica: Se caracterizaron los efluentes no domésticos según los 23 parámetros que dictamina el Decreto Supremo N°021-009-Vivienda “Aprueban Valores Máximos Admisibles (VMA) de las descargas de aguas residuales no domésticas

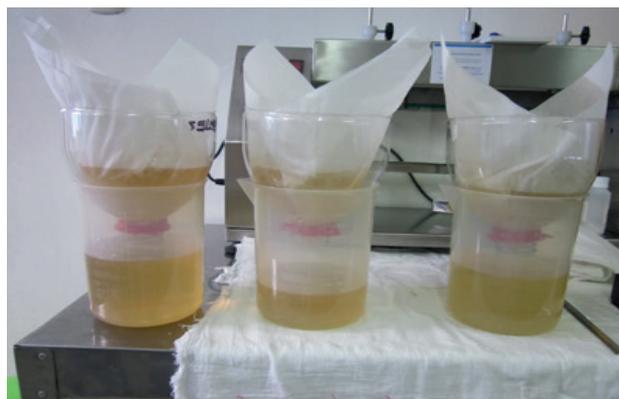
en el sistema de alcantarillado sanitario”. La toma de muestra puntual y compuesta y la conservación de la misma se realizó de acuerdo a la Resolución de Consejo Directivo N° 044-2012-SUNASS-CD.

Lugar de recolección: Se consideró un único punto de recolección donde desembocaban los efluentes industriales, más no domésticos, de la industria en mención. En este punto se reunían tres salidas de cada una de las áreas de la empresa: Koji, Moromi y Cocina/Producción. Este punto de recolección se encontraba dentro de la empresa y era de fácil acceso, ya que sólo tenía 1 m de profundidad, aproximadamente.

Procedimiento de recolección: Se obtuvieron las muestras en frascos de plástico limpios y desinfectados. Las muestras tuvieron un volumen de 2 L y se recolectaron cada h desde las 07:00 h hasta las 19:00 h. Se formó así una muestra compuesta de 24 L, la cual se conservó a 4-5°C de temperatura por un máximo de 24 h hasta su procesamiento.

Pre-tratamiento por filtración: La muestra compuesta de 24 L se filtró 3 veces con una tela sintética de 0,1 mm de porosidad, con el fin de librar a la muestra de sólidos gruesos. Como se observa en la figura 1, para esto se utilizaron embudos

plásticos limpios y desinfectados, envases plásticos, baldes plásticos y una jarra plástica con la cual se distribuía el efluente lentamente para no levantar los sólidos sedimentables gruesos que se encontraban en el fondo del mismo. Esta operación se realizaba en menos de 20 min, en los cuales el efluente pasaba de temperatura de refrigeración a temperatura ambiente. Además, de los 24 L almacenados sólo se trabajó con 18 L, el resto se desechó debido a que contenía gran cantidad de material sedimentable como muestra la figura 2.



**Figura 1.** Pre-tratamiento por filtración del efluente no doméstico de industria alimentaria.



**Figura 2.** Sólidos sedimentables presentes en el efluente no doméstico de la industria alimentaria.

Ensayo de prueba de jarras: Se realizó según la norma ASTM D2035-13 *Standard Practice for Coagulation-Flocculation Jar Test of Water*. Para ello, se utilizó un equipo floculador automático con 3 puestos en línea y 4 velocidades programables: 40, 75, 160 y 210 rpm. Asimismo, los parámetros previos y posteriores varían de acuerdo a la etapa en que se realizó el ensayo, como se detalla en la tabla 2. Además, entre los parámetros considerados para medir la eficiencia de los tratamientos se consideró al índice de

Willcomb, tal como se establece en la tabla 3 y se estima cuando culmina el tiempo de sedimentación y antes de captar las muestras sobrenadantes para su posterior análisis. Por otro lado, los coagulantes y floculantes en solución se agregaron a los beakers “jarras” utilizando jeringas de un solo uso. De la misma manera, se utilizaron estas jeringas para recolectar el efluente sobrenadante con mucho cuidado para realizar los análisis post-tratamiento necesarios.

**Tabla 2.** Características de la prueba de jarras realizada para el efluente de la industria alimentaria.

	Coagulación	Floculación	Sedimentación
Tiempo (min)	1	20	15
Velocidad de agitación (rpm)	-40 -75	-160 -210	-
Reactivos	-Sulfato de aluminio -Policloruro de aluminio	-Poliacrilamida aniónica -Almidón gelatinizado	-
Parámetros previos*	-pH -Temperatura -Absorbancia -Turbidez -DQO		
Parámetros posteriores*	-Índice que Willcomb -Absorbancia -Turbidez -DQO		
Equipos	-Cronómetro -pH-metro portátil marca Hanna HI 9812 -Espectrofotómetro GENESYS™ 20 Thermo Fisher Scientific -Placa de calentamiento con horadaciones para los tubos de reacción de DQO (temperatura de 150°C ± 2°C)		

\*Los parámetros previos y posteriores dependen de la etapa en que se realizó la prueba de jarras (se detalla más adelante)

**Tabla 3.** Índice de Willcomb.

N° de índice	Índice de Willcomb
0	Flóculo coloidal. Ningún signo de aglutinación.
2	Visible. Flóculo muy pequeño, casi imperceptible.
4	Disperso. Flóculo bien formado pero uniformemente distribuido (sedimenta muy lentamente o no sedimenta).
6	Claro. Flóculo de tamaño relativamente grande pero que precipita con lentitud.
8	Bueno. Flóculo que deposita fácil pero no completamente.
10	Bueno. Flóculo que deposita fácil y completamente

## Reactivos utilizados en el ensayo de la prueba de jarras

### Coagulantes

**Sulfato de Aluminio:** Fue de tipo A *food grade*, tuvo apariencia sólida granulada de color blanco. Su presentación fue en una bolsa de polipropileno con liner interno de polietileno de 25 kg. Se pesó 15 g de sulfato de aluminio y se vertió en una fiola de 1L donde se agregó el agua destilada necesaria para formar una disolución de 1,5%. Esta mezcla se traspasó a un beaker con una barra magnética dentro, el mismo que se puso sobre un agitador magnético por aproximadamente 10 min. Pasado este tiempo la disolución se traspasó a una botella de vidrio correctamente rotulada, limpia y desinfectada. Esto se realizó cada día que fuese necesario. Cada vez que se preparó, se utilizó el mismo día.

**Policloruro de Aluminio:** El policloruro de aluminio o hidroxiclorigenato de aluminio, tenía apariencia líquida ámbar claro. Su presentación fue un cilindro plástico de 30 kg. Este producto se utilizó sin diluir, según especificaciones del fabricante, tenía una pureza de aluminio (Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>) de 18 a 22%. Se conservó en una botella de vidrio correctamente rotulada, limpia y desinfectada. Por otro lado, para calcular la dosis empleada en los ensayos de prueba de jarras se tomó como referencia la concentración de 20% por ser el número intermedio entre 18 y 22%, tomando en cuenta las especificaciones del fabricante.

### Floculantes

**Poliacrilamida aniónica:** La poliacrilamida aniónica seca de alto peso molecular, con nombre comercial Kemira Superfloc A-110®, tuvo apariencia sólida granulada de color blanco. Su presentación fue una bolsa de

polipropileno con liner interno de polietileno de 25 kg. Se pesó 0,1 g de poliacrilamida y se vertió en un beaker de 100 mL, correctamente rotulado, donde se agregó el agua destilada necesaria para formar una disolución de 0,1%. Se introdujo una barra magnética dentro del beaker y se colocó en un agitador magnético por aproximadamente 30 min. Pasado este tiempo se utilizó un cuadrado de papel aluminio para sellar la boca del beaker y se dejó reposar la disolución por 1 h antes de ser utilizada. Esto se realizó cada día que fuese necesario. Cada vez que se preparó, se utilizó el mismo día.

**Almidón de papa:** El almidón de *S. tuberosum* ‘papa’, tuvo apariencia sólida como polvo fino blanco. Su presentación fue una bolsa de polipropileno con liner interno de polietileno de 5 kg. Se pesó 3 g de almidón y se vertió en un beaker de 2 L con 1 L de agua destilada fría. Se calentó la muestra hasta ebullición en un agitador magnético con parrilla calefactora. Se dejó hervir por 15 min, sin dejar de agitar. Pasado este tiempo, se traspasó el contenido a una fiola de 1L donde se agregó el agua destilada necesaria para formar una disolución de 0,3%. Se traspasó el contenido a una botella de vidrio correctamente rotulada, limpia y desinfectada. Esto se realizó cada día que fuese necesario. Cada vez que se preparó, se utilizó el mismo día.

**Pruebas de variación de pH:** Como señala la norma ASTM D2035-13, se midió el pH inicial y el pH final de la muestra después del tratamiento. Por cuestiones de espacio y costo (previo acuerdo con la industria alimentaria patrocinadora) se decidió no modificar el pH inicial de la muestra. Por ello se realizaron pruebas de variación de pH para verificar que la muestra después del tratamiento aún cumpliera con los VMA es decir que se mantuviera entre 6 – 9 unidades de pH. Las especificaciones de esta prueba se detallan en la tabla 4.

**Tabla 4.** Pruebas de variación de pH en el efluente no doméstico de la industria alimentaria.

Etapa	Parámetros iniciales	Parámetros posteriores	Número total de pruebas
Ensayos de prueba de jarras cualitativas	-Temperatura -pH	-Índice de Willcomb -Tiempo de aparición del primer floc	5
Ensayos de prueba de jarras preliminares	-Temperatura -pH -Absorbancia	-Índice de Willcomb -Absorbancia -Porcentaje de reducción de absorbancia -Absorbancia	6
Ensayos de prueba de jarras finales	-Temperatura -pH -Absorbancia -Turbidez -DQO	-Porcentaje de reducción de absorbancia -Turbidez -Porcentaje de remoción de turbidez -DQO -Porcentaje de reducción de DQO	6
Total			17

**Tabla 5.** Ensayo de prueba de jarras: Diferentes etapas y sus características.

pH	Medición
pH <sub>i</sub>	El pH inicial se tomó cuando la muestra estaba siendo sometida a una velocidad de agitación de 75rpm. No pasó por ningún tratamiento químico, sólo pasó por el pre-tratamiento de filtración anteriormente mencionado.
pH <sub>2</sub>	El pH intermedio se midió después de haberse agregado el coagulante y haberse agitado por 1min, aumentando la velocidad a 210rpm.
pH <sub>f</sub>	El pH final se leyó después de agregarse el floculante y haberse agitado por 20min a 40rpm.

Etapas del ensayo de la prueba de jarras: El ensayo de prueba de jarras se dividió en 3 etapas para encontrar los mejores parámetros para el tratamiento del efluente industrial no doméstico de la industria alimentaria, los detalles se explican en la tabla 5. En todas las etapas, cada tratamiento se realizó por triplicado.

### Medida de los parámetros fisicoquímicos

**Absorbancia:** Se consideró la longitud de onda 560 nm, debido a que la intensidad del color caramelo se mide a 560 nm (FAO, 2001). El color caramelo era el causante del color presente en el efluente no doméstico de la industria alimentaria, ya que a la salsa de soya “siyau” se le agrega color caramelo para que el producto tome ese color oscuro característico. Además, se realizó un barrido espectral con el espectrofotómetro GENESYS™ 20 Thermo Fisher Scientific desde 350 a 1110 con intervalos de 50, esto se realizó a 10 muestras iniciales compuestas de efluente industrial no doméstico después de su respectivo pre-tratamiento de filtrado. Para realizar esto, se siguió el procedimiento a continuación descrito: Se encendió el equipo 15 min antes de realizar cualquier lectura, para estabilizar la intensidad de luz. Se colocó la longitud de onda deseada. Se graduó el espectrofotómetro con el blanco, agua destilada, y se llevó a cero. Se retiró el blanco y se colocó la muestra de efluente con mucho cuidado. Se esperó que establezca la lectura. Y se anotó el valor de la lectura. Se repitió el procedimiento para cada lectura. Seguidamente, se realizó la curva absorbancia vs. Longitud de onda para determinar a longitud de onda de máxima absorción, para considerarla como variable respuesta de los tratamientos.

**Turbidez:** Se midió la turbidez de acuerdo a la norma: SM 2130B: APHA (2012); “EPA”: U.S. Environmental Protection Agency. Methods for Chemical Analysis of Water and Wastes. Las muestras hasta ser recogidas se mantuvieron a temperatura de refrigeración y se siguieron todas las indicaciones requeridas para la correcta conservación de la muestra tratada.

**DQO:** En el caso de la medida de la DQO de las muestras iniciales de los ensayos finales se realizó de manera interna. Ya que, como parte de esta investigación recién se

estaba implementando dicho procedimiento, se tomó la precaución de tercerizar la medida de DQO después del tratamiento. Entonces, de igual manera que la turbidez, se siguió los lineamientos de la norma: SM 5210B (APHA, 2012). En el caso de esta variable respuesta, sólo se midió a los mejores resultados de remoción de turbidez en cada ensayo final. Debido a que el cálculo de la DQO toma bastante tiempo e implicaba un costo adicional, se realizó una regresión con los datos de la turbidez y la DQO para realizar un monitoreo de la carga orgánica presente en los efluentes descargados al alcantarillado a nivel interno, a partir de los valores de turbidez que se podrían calcular al medir la absorbancia.

**Medida de los porcentajes de remoción y reducción:** Los porcentajes remoción y reducción de cada una de las variables respuesta se realizó con una regla de tres simple.

**Comparación de la absorbancia con la turbidez:** Se realizó una regresión entre todos los resultados de la absorbancia a dos longitudes de onda escogidas, con sus respectivos resultados de turbidez para establecer cuál de las dos longitudes de onda era la apropiada para tomar como referencia y calcular el grado de contaminación orgánica presente en el efluente industrial no doméstico de la industria alimentaria, en vez de tomar la turbidez, ya que no se contaba con un nefelómetro, pero sí contaba con un espectrómetro Espectrofotómetro GENESYS™ 20 Thermo Fisher Scientific. Así, se tomó como coeficiente de determinación al R cuadrado y se pudo elegir la longitud de onda apropiada.

**Comparación de la turbidez con la DQO:** se realizó una regresión entre todos los resultados de turbidez con sus respectivos resultados de DQO, para conocer el grado de correlación entre estas dos variables dependientes después de los tratamientos de todos los ensayos finales. De igual forma, se tomó como coeficiente de determinación a R cuadrado y se pudo calcular una fórmula con la cual se pudo conocer la cantidad de carga orgánica al relacionarla con la turbidez obtenida. Como se mencionó anteriormente, en el caso de la DQO sólo se midió a los mejores resultados de turbidez para cada ensayo final, los demás quedaron como valores no determinados “NA”.

## RESULTADOS

### Caracterización del agua residual no doméstica

Los valores obtenidos para esta caracterización inicial se detallan en las tablas 6 y 7. Como muestra la tabla 6, los dos únicos parámetros donde el efluente no cumple con los VMA es en la demanda bioquímica de oxígeno (DBO<sub>5</sub>) y en la demanda química de oxígeno (DQO), por ello es que el problema a resolver se enfoca en disminuir la carga orgánica en el efluente. Además en la tabla 7, se nota que en algunas tomas de la muestra puntual del efluente a veces excede en sólidos sedimentables y en temperatura, estos problemas son más fáciles de tratar debido a que se pueden solucionar con un simple de pre-tratamiento de filtración y/o homogenización. Es así como, se toma como parámetro de eficiencia de los tratamientos al DQO, que deberá mantenerse menor a 1000 para poder cumplir con los VMA.

**Tabla 6.** Valores obtenidos a partir de una muestra compuesta de efluente no doméstico de la industria alimentaria.

Parámetro	Expresión	Valor obtenido (mg·L <sup>-1</sup> )	VMA (mg·L <sup>-1</sup> )
Demanda bioquímica de oxígeno	DBO <sub>5</sub>	770	500
Demanda química de oxígeno	DQO	1777	1000
Sólidos suspendidos totales	SST	479	500
Aceites y grasas	A y G	22,3	100
Aluminio	Al	0,2646	10
Arsénico	As	0,0092	0,5
Boro	B	0,4376	4
Cadmio	Cd	0,0015	0,2
Cianuro	CN	0,004	1
Cobre	Cu	0,0139	3
Cromo hexavalente	Cr <sup>6</sup>	0,0005	0,5
Cromo total	Cr	0,0033	10
Manganeso	Mn	0,067	4
Mercurio	Hg	0,00005	0,02
Níquel	Ni	0,0114	4
Plomo	Pb	0,013	0,5
Sulfatos	SO <sub>4</sub> <sup>-2</sup>	104,7	500
Sulfuros	S <sup>-2</sup>	0,02	5
Zinc	Zn	0,1350	10
Nitrógeno Amoniacal	NH <sup>+4</sup>	7,95	80

**Tabla 7.** Valores obtenidos a partir de una muestra puntual de efluente no doméstico de la industria alimentaria.

Toma	Sólidos Sedimentables (mL·L <sup>-1</sup> ·h <sup>-1</sup> )	pH	Temperatura (°C)	Caudal (L·s <sup>-1</sup> )
1°	10,5	7,79	33,9	0,9
2°	13,5	8,15	26,8	0,9
3°	15	8,02	27,7	0,2
4°	14,5	7,88	25,4	1,2
5°	20,5	8,13	23,6	0,9
6°	15,5	7,66	26,8	0,1
7°	17	7,54	26,5	0,2
8°	20	7,96	35,5	0,5
9°	19,5	6,22	37,3	0,2
10°	17,5	7,82	24,9	0,2
11°	15,5	6,55	40,3	0,5
12°	10	7,97	39,3	1,0
VMA	8,5 mL/L/h	6 – 9	35 °C	NA

### Medida de los parámetros fisicoquímicos

Absorbancia: Barrido espectral

**Tabla 8.** Barrido espectral de la muestra inicial “Mi” de efluente no doméstico de la industria alimentaria.

nm	Mi <sub>1</sub>	Mi <sub>2</sub>	Mi <sub>3</sub>	Mi <sub>4</sub>	Mi <sub>5</sub>	Mi <sub>6</sub>	Mi <sub>7</sub>	Mi <sub>8</sub>	Mi <sub>9</sub>	Mi <sub>10</sub>
350	1,111	0,270	0,656	0,644	0,507	0,779	0,538	0,665	1,031	0,911
400	0,744	1,470	0,449	0,437	0,337	0,550	0,402	0,423	0,664	0,544
450	0,607	1,063	0,358	0,348	0,249	0,423	0,331	0,324	0,527	0,407
500	0,499	0,844	0,292	0,298	0,218	0,337	0,294	0,264	0,419	0,299
550	0,446	0,720	0,263	0,266	0,177	0,299	0,255	0,237	0,366	0,246
600	0,409	0,600	0,236	0,236	0,167	0,256	0,236	0,204	0,329	0,209
650	0,364	0,553	0,213	0,220	0,153	0,230	0,213	0,180	0,284	0,164
700	0,330	0,500	0,202	0,205	0,135	0,212	0,200	0,162	0,250	0,130
750	0,300	0,473	0,189	0,185	0,123	0,194	0,186	0,154	0,220	0,100
800	0,279	0,417	0,158	0,171	0,116	0,172	0,168	0,142	0,199	0,079
850	0,270	0,395	0,212	0,165	0,109	0,162	0,161	0,129	0,190	0,070
900	0,249	0,394	0,251	0,153	0,099	0,157	0,149	0,124	0,169	0,049
950	0,232	0,375	0,129	0,141	0,095	0,140	0,141	0,122	0,152	0,032
1000	0,225	0,351	0,127	0,135	0,089	0,129	0,132	0,116	0,145	0,025
1050	0,212	0,335	0,121	0,126	0,079	0,125	0,128	0,109	0,132	0,012
1010	0,211	0,317	0,121	0,120	0,075	0,117	0,121	0,105	0,131	0,011

Como expone la tabla 8 y la figura 3, en todos los casos la longitud de onda 350nm presenta la máxima absorción, excepto en una muestra “Mi2” donde hubo exceso de sólidos suspendidos. Por ello, se escogió la longitud de onda 350nm para calcular la absorbancia como parámetro de eficiencia de los tratamientos en los ensayos de la prueba de jarras. A parte de la longitud de onda 560nm que, como se mencionó anteriormente, se está considerando por el color caramelo presente en el efluente.

Por otro lado, debido a la gran variación de las mediciones se tomaron medidas en las áreas de producción para que el proceso se uniformice de tal manera que la muestra sea más uniforme en cuanto a sus características. Las tres medidas más importantes se enlistan a continuación. En cada área habían canaletas en el piso, donde se les prohibió a los operarios que desechen los restos de soya, trigo, koji, etc. Ahora, debían recogerlo con el uso de un jalador y recogedor y eliminarlo como residuo sólido. En el área de Moromi y Envasado, se implementó un lavado con salmuera a los equipos donde los restos debían entrar a

reproceso y no ser enviados directamente al alcantarillado como se estaba manejando previamente. Se realizaron capacitaciones para promover la concientización al personal operario en temas de VMA.

Ensayo de prueba de jarras  
Pruebas de variación de pH

Las pruebas realizadas para determinar el cambio de pH antes y después de los tratamientos se detalla en la tabla 9.

**Tabla 9.** Pruebas de variación de pH del efluente no doméstico de industria alimentaria.

Prueba	pH <sub>i</sub>	pH <sub>2</sub>	pH <sub>f</sub>
		+ 255mg·L <sup>-1</sup> Sulfato de Aluminio	+ 5 mg·L <sup>-1</sup> PAM
1		6,50	6,53
2	6,79	6,45	6,65
3		6,52	6,61
		+ 100mg·L <sup>-1</sup> PAC	+ 5 mg·L <sup>-1</sup> PAM
4		6,92	6,90
5	7,01	6,96	6,94
6		6,94	6,91
		+ 255mg·L <sup>-1</sup> Sulfato de Aluminio	+ 350 mg·L <sup>-1</sup> Almidón Gelatinizado
7		6,61	6,54
8	6,88	6,60	6,55
9		6,58	6,51
		+ 100mg·L <sup>-1</sup> PAC	+ 350 mg·L <sup>-1</sup> Almidón gelatinizado
10		6,93	6,90
11	7,03	6,94	6,88
12		6,93	6,89

Ya que el pH inicial “pH<sub>i</sub>”, intermedio “pH<sub>2</sub>” y final “pH<sub>f</sub>” se mantienen dentro del rango aceptado por los VMA, es decir de

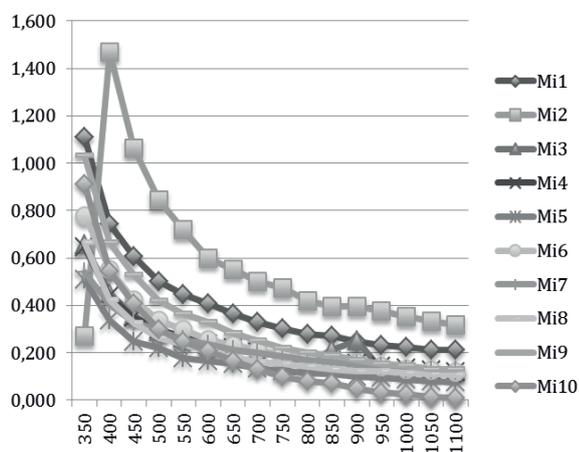
6 – 9, en adelante sólo se tomó el pH inicial para asegurar de esa manera que el pH final también cumpliría con los VMA.

**Tabla 10.** Prueba cualitativa 1: sulfato de aluminio y poliacrilamida aniónica.

Cód.	Dosis de sulfato de aluminio (mg·L <sup>-1</sup> )	Conc. de sulfato de aluminio (%)	Dosis de PAM (mg·L <sup>-1</sup> )	Conc. de PAM (%)	Tiempo de aparición de primer floc	Índice de Willcomb
I1		0,1			No formó	0
I2		0,1			No formó	0
I3		0,1			No formó	0
I4		0,5			No formó	1
I5		0,5			No formó	1
I6		0,5			No formó	1
I7		1,0			40”	4
I8		1,0			40”	4
I9		1,0			40”	4
I10	300	1,5	5	0,1	11”	10
I11		1,5			11”	10
I12		1,5			11”	10
I13		2,0			10”	10
I14		2,0			10”	10
I15		2,0			10”	10
I16		2,5			14”	8
I17		2,5			14”	8
I18		2,5			14”	8

Pruebas cualitativas considerando el parámetro: Índice de Willcomb

Sulfato de aluminio y Poliácridamida aniónica.



**Figura 3.** Curva de absorbancia vs. longitud de onda del efluente industrial no doméstico de la industria alimentaria.

Como se observa en la tabla 10. El sulfato de aluminio al 0,1% y 0,5% no produjo ninguna formación de floc, Mientras que la concentración 2,0% y 2,5 % tardaron pocos seg para la aparición del primer floc pero, fueron difíciles de preparar debido a que la solución se saturaba, por ello quedaron descartadas para usarse posteriormente. Así, sobresalió la concentración 1,5% que sólo tardó 11 seg para formar el primer floc y que obtuvo 10 en el índice de Willcomb. Se eligió la concentración 1,5% de peso de sulfato de aluminio en volumen de agua destilada para continuar en los ensayos preliminares.

En el caso de la poliácridamida aniónica se siguieron las indicaciones del fabricante para preparar la concentración correcta que fue de 0,1% de peso en volumen de agua destilada.

**Policloruro de aluminio y Poliácridamida aniónica**

Debido a que el policloruro de aluminio ya se recibió en solución del proveedor, no se realizaron pruebas cualitativas para determinar su concentración, sólo para determinar la dosis correcta.

**Tabla 11.** Prueba cualitativa 2: policloruro de aluminio y poliácridamida aniónica.

Cód.	Dosis de policloruro de aluminio (mg·L <sup>-1</sup> )	Conc. de policloruro de aluminio	Dosis de PAM (mg·L <sup>-1</sup> )	Conc. de PAM (%)	Tiempo de aparición de primer floc	Índice de Willcomb
J1	20				14"	4
J2	20				14"	4
J3	20				14"	4
J4	40				9"	6
J5	40				9"	6
J6	40				9"	6
J7	60				6"	8
J8	60				6"	8
J9	60				6"	8
J10	80	20% de Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	5	0,1	3"	10
J11	80				3"	10
J12	80				3"	10
J13	100				1"	10
J14	100				1"	10
J15	100				1"	10
J16	120				1"	10
J17	120				1"	10
J18	120				1"	10

La tabla 11 muestra que cuando se probaron seis diferentes dosis de policloruro de aluminio, manteniendo constante la dosis de poliácridamida aniónica y la concentración de la poliácridamida aniónica, las mejores dosis de policloruro de aluminio fueron 100 y 120 mg·L<sup>-1</sup> ya que para ambas el tiempo de aparición del primer floc fue de

1 seg, asimismo ambas tuvieron una puntuación de 10 en el índice de Willcomb indicando que el resultado fue bueno, floc que depositó fácil y completamente.

Se tomó como referencia este rango para continuar en las pruebas preliminares.

## Sulfato de aluminio y almidón gelatinizado

**Tabla 12.** Prueba cualitativa 3: sulfato de aluminio y almidón gelatinizado.

Cód.	Dosis de sulfato de aluminio (mg·L <sup>-1</sup> )	Conc. de sulfato de aluminio (%)	Dosis de almidón gelatinizado (mg·L <sup>-1</sup> )	Conc. de almidón gelatinizado (%)	Tiempo de aparición de primer floc	Índ. de Willcomb
K1			5			
K2			5			
K3			5			
K4			10			
K5			10			
K6			10			
K7			20			
K8			20			
K9	300	1,5	20	0,1	No formó	0
K10			30			
K11			30			
K12			30			
K13			40			
K14			40			
K15			40			
K16			50			
K17			50			
K18			50			

La tabla 12 expone que se probaron seis diferentes dosis de almidón gelatinizado, manteniendo constante la dosis en 0,1%. Asimismo, se mantuvo constante la concentración de sulfato de aluminio y su dosis. Ya que todos los tratamientos obtuvieron 0 en el índice de Willcomb,

indicando que el resultado fue un floc coloidal con ningún signo de aglutinación. Se realizaron más pruebas para determinar la concentración y dosis adecuadas del almidón gelatinizado.

**Tabla 13.** Prueba cualitativa 4: sulfato de aluminio y almidón gelatinizado.

Cód.	Dosis de sulfato de aluminio (mg·L <sup>-1</sup> )	Conc. de sulfato de aluminio (%)	Dosis de almidón gelatinizado (mg·L <sup>-1</sup> )	Conc. de almidón gelatinizado (%)	Tiempo de aparición de primer floc	Índ. de Willcomb
L1			120		No formó	0
L2			120		No formó	0
L3			120		No formó	0
L4			140		No formó	0
L5			140		No formó	0
L6			140		No formó	0
L7			160		No formó	0
L8			160		No formó	0
L9	300	1,5	160	0,2	No formó	0
L10			180		No formó	0
L11			180		No formó	0
L12			180		No formó	0
L13			200		40"	2
L14			200		40"	2
L15			200		40"	2
L16			220		30"	4
L17			220		30"	4
L18			220		30"	4

Se probaron seis diferentes dosis de almidón gelatinizado, manteniendo constante la dosis en 0,2%. Asimismo, se mantuvo constante la concentración de sulfato de aluminio y su dosis (Tabla 13).

Los resultados no fueron favorables tampoco, así que se realizaron más pruebas para determinar la concentración y dosis adecuadas del almidón gelatinizado.

**Tabla 14.** Prueba cualitativa 5: sulfato de aluminio y almidón gelatinizado.

Cód.	Dosis de sulfato de aluminio (mg·L <sup>-1</sup> )	Conc. de sulfato de aluminio (%)	Dosis de almidón gelatinizado (mg·L <sup>-1</sup> )	Conc. de almidón gelatinizado (%)	Tiempo de aparición de primer floc	Índ. de Willcomb
M1			240		20"	6
M2			240		20"	6
M3			240		20"	6
M4			270		22"	8
M5			270		22"	8
M6			270		22"	8
M7			300		17"	8
M8			300		17"	8
M9			300		17"	8
M10	300	1,5	330	0,3	20"	10
M11			330		20"	10
M12			330		20"	10
M13			360		19"	8
M14			360		19"	8
M15			360		19"	8
M16			390		16"	8
M17			390		16"	8
M18			390		16"	8

En la tabla 14 describe que se probaron seis diferentes dosis de almidón gelatinizado, manteniendo constante su dosis en 0,3%. Asimismo, se mantuvo constante la concentración de sulfato de aluminio y su dosis. Así, la mejor dosis de almidón gelatinizado fue 330 mg·L<sup>-1</sup> ya que el tiempo de aparición del primer floc fue de 20 seg con una puntuación de 10 en el índice de Willcomb indicando que el resultado fue bueno, floc que deposita fácil y completamente. Adicionalmente, se intentó preparar una disolución de almidón gelatinizado al 0,4%, pero la solución presentó signos de saturación sin lograrse

una dilución adecuada y se eligió la concentración al 0,3% para continuar con las pruebas preliminares.

Pruebas preliminares considerando el parámetro: absorbancia.

**Ensayo preliminar 1: Sulfato de aluminio 1,5% y poliacrilamida aniónica 0,1%**

Absorbancia inicial: 350nm = 0,472.  
560nm = 0,269.

**Tabla 15.** Resultados del ensayo preliminar 1: sulfato de aluminio 1,5% y poliacrilamida aniónica 0,1%.

Cód.	pH <sub>i</sub>	Temp. (°C)	Dosis (mg·L <sup>-1</sup> )		Vel. (rpm)	Dosis (mg·L <sup>-1</sup> )	Vel. (rpm)	Índ. de Willcomb	Absorbancia final	
			Coagulación						Floculación	350nm
A1			150	160				4	0,224	0,086
A2	6,93	16,2	255	160				8	0,135	0,016
A3			300	160				6	0,162	0,052
A4			450	160				6	0,177	0,058
A5	6,85	16,9	600	160				6	0,181	0,061
A6			750	160				6	0,189	0,065
A7			210	160				8	0,137	0,020
A8	6,88	17,4	255	160				8	0,136	0,018
A9			240	160				8	0,142	0,024
A10			150	210	5	75		4	0,222	0,082
A11	6,87	17,9	255	210				8	0,133	0,013
A12			300	210				6	0,161	0,050
A13			450	210				6	0,171	0,053
A14	6,83	18,1	600	210				6	0,179	0,059
A15			750	210				6	0,183	0,061
A16			210	210				8	0,134	0,017
A17	6,71	18,4	255	210				8	0,131	0,013
A18			240	210				8	0,137	0,021

Como se observa en la tabla 15, manteniendo constante la dosis de poliacrilamida aniónica 0,1% en 5 mg·L<sup>-1</sup> y la velocidad de floculación en 75 rpm, se probaron ocho dosis de sulfato de aluminio 1,5%, cada una con dos diferentes velocidades de coagulación: 160 rpm y 210 rpm. Así, la

mejor dosis fue 255 mg·L<sup>-1</sup> de sulfato de aluminio al 1,5% al ejercerse la velocidad de coagulación de 210 rpm, ya que dio como resultado un porcentaje de reducción de 72,25% de absorbancia a 350nm y 95,17% a 560nm, como se exhibe en la tabla 16, en el tratamiento "A17".

**Tabla 16.** Porcentajes de remoción del ensayo preliminar 1: sulfato de aluminio 1,5% y poliacrilamida aniónica 0,1%.

Código	Absorbancia inicial		Absorbancia final		Porcentaje de reducción (%)	
	350nm	560nm	350nm	560nm	350nm	560nm
A1			0,224	0,086	52,54	68,03
A2			0,135	0,016	71,40	94,05
A3			0,162	0,052	65,68	80,67
A4			0,177	0,058	62,50	78,44
A5			0,181	0,061	61,65	77,32
A6			0,189	0,065	59,96	75,84
A7			0,137	0,020	70,97	92,57
A8			0,136	0,018	71,19	93,31
A9			0,142	0,024	69,92	91,08
A10	0,472	0,269	0,222	0,082	52,97	69,52
A11			0,133	0,013	71,82	95,17
A12			0,161	0,050	65,89	81,41
A13			0,171	0,053	63,77	80,30
A14			0,179	0,059	62,08	78,07
A15			0,183	0,061	61,23	77,32
A16			0,134	0,017	71,61	93,68
A17			0,131	0,013	72,25	95,17
A18			0,137	0,021	70,97	92,19

### Ensayo preliminar 2: Sulfato de aluminio 1,5% y poliacrilamida aniónica 0,1%

Absorbancia inicial: 350nm = 0,451.  
560nm = 0,247.

**Tabla 17.** Resultados del ensayo preliminar 2: sulfato de aluminio 1,5 % y poliacrilamida aniónica 0,1%.

Cód.	pH <sub>i</sub>	Temp. (°C)	Dosis (mg·L <sup>-1</sup> )		Vel. (rpm)		Índ. de Willcomb	Absorbancia final	
			Coagulación	Floculación	Coagulación	Floculación		350nm	560nm
B1			195		75	6	0,137	0,019	
B2	6,81	16,4	210		75	8	0,135	0,017	
B3			225		75	8	0,133	0,016	
B4			240		75	8	0,138	0,021	
B5	6,86	16,7	255	3	75	8	0,141	0,022	
B6			270		75	8	0,142	0,024	
B7			210		40	8	0,133	0,015	
B8	6,89	17,0	225		40	8	0,132	0,014	
B9			240		40	8	0,136	0,020	
B10			195	210	75	6	0,138	0,022	
B11	6,93	17,3	210		75	8	0,134	0,017	
B12			225		75	8	0,130	0,015	
B13			240		75	8	0,136	0,021	
B14	6,99	17,6	255	5	75	8	0,139	0,023	
B15			270		75	8	0,142	0,024	
B16			210		40	10	0,132	0,016	
B17	7,02	17,8	225		40	10	0,129	0,013	
B18			240		40	10	0,134	0,019	

La tabla 17 expone que en el ensayo preliminar 2, se mantuvo constante la velocidad de coagulación a 210 rpm y se probaron seis diferentes dosis de sulfato de aluminio al 1,5% cada una con dos diferentes dosis de poliacrilamida aniónica al 0,1%: 3 y 5 mg·L<sup>-1</sup>, y dos

velocidades de floculación: 40 rpm y 75 rpm. Además, en la tabla 18 se exhibe que el mejor tratamiento fue adicionar 225 mg·L<sup>-1</sup> de sulfato de aluminio al 1,5% al ejercerse la velocidad de coagulación de 210 rpm, agregando 5 mg·L<sup>-1</sup> de poliacrilamida aniónica al 0,1%

a una velocidad de floculación de 40 rpm, ya que dio como resultado un porcentaje de reducción de 71,40%

de absorbancia a 350nm y 94,74% a 560nm, como lo muestra la tabla 18 en el tratamiento “B17”.

**Tabla 18.** Porcentajes de remoción del ensayo preliminar 2: sulfato de aluminio 1,5% y poliacrilamida aniónica 0,1%.

Código	Absorbancia inicial		Absorbancia final		Porcentaje de reducción (%)	
	350nm	560nm	350nm	560nm	350nm	560nm
B1			0,137	0,019	69,62	92,31
B2			0,135	0,017	70,07	93,12
B3			0,133	0,016	70,51	93,52
B4			0,138	0,021	69,40	91,50
B5			0,141	0,022	68,74	91,09
B6			0,142	0,024	68,51	90,28
B7			0,133	0,015	70,51	93,93
B8			0,132	0,014	70,73	94,33
B9			0,136	0,020	69,84	91,90
B10	0,451	0,247	0,138	0,022	69,40	91,09
B11			0,134	0,017	70,29	93,12
B12			0,130	0,015	71,18	93,93
B13			0,136	0,021	69,84	91,50
B14			0,139	0,023	69,18	90,69
B15			0,142	0,024	68,51	90,28
B16			0,132	0,016	70,73	93,52
B17			0,129	0,013	71,40	94,74
B18			0,134	0,019	70,29	92,31

Entonces al comparar el tratamiento preliminar 1 y el tratamiento preliminar 2, se concluye que el mejor tratamiento fue el “A17” con los siguientes parámetros: el coagulante sulfato de aluminio al 1,5% con la dosis 255 mg·L<sup>-1</sup> a 210 rpm y el floculante poliacrilamida aniónica 0,1% con la dosis 5 mg·L<sup>-1</sup> y la velocidad de floculación en 75 rpm. Así, estos parámetros se tomaron en cuenta en

los tratamientos finales 1 y 2.

**Ensayo preliminar 3: Policloruro de aluminio 20% y poliacrilamida aniónica 0,1%**

Absorbancia inicial: 350nm = 0,453  
560nm = 0,284

**Tabla 19.** Resultados del ensayo preliminar 3: policloruro de aluminio 20% y poliacrilamida aniónica 0,1%.

Cód.	pH <sub>i</sub>	Temp. (°C)	Dosis (mg·L <sup>-1</sup> )		Vel. (rpm)		Índ. de Willcomb	Absorbancia final	
			Coagulación	Floculación				350nm	560nm
C1			20	160			6	0,159	0,071
C2	7,14	16,7	40	160			6	0,096	0,035
C3			60	160			6	0,051	0,029
C4			80	160			8	0,045	0,017
C5	7,07	17,1	100	160			8	0,042	0,010
C6			120	160			8	0,044	0,011
C7			60	160			6	0,053	0,013
C8	7,04	17,4	80	160			8	0,044	0,012
C9			100	160			8	0,040	0,008
C10			20	210	3	75	6	0,158	0,069
C11	7,07	17,8	40	210			6	0,091	0,030
C12			60	210			6	0,048	0,026
C13			80	210			8	0,041	0,015
C14	7,03	18,0	100	210			8	0,038	0,009
C15			120	210			8	0,043	0,010
C16			60	210			6	0,050	0,011
C17	7,00	18,5	80	210			10	0,042	0,009
C18			100	210			10	0,035	0,006

En la tabla 19 se observa que en el ensayo preliminar 3, se mantuvo constante la dosis de floculante en  $3 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$  y la velocidad de floculación en 75 rpm, se probaron seis diferentes dosis de policloruro de aluminio 20% cada una con dos diferentes velocidades de coagulación: 160 rpm y 210 rpm. Se descubrió que la mejor dosis fue  $100 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$

de policloruro de aluminio 20% al ejercerse la velocidad de coagulación de 210 rpm, ya que dio como resultado un porcentaje de reducción de 92,27% de absorbancia a 350nm y 97,89% a 560nm, como muestra el tratamiento "C18" (Tabla 20).

**Tabla 20.** Porcentajes de remoción del ensayo preliminar 3: policloruro de aluminio 20% y poliácridamida aniónica 0,1%.

Código	Absorbancia inicial		Absorbancia final		Porcentaje de reducción (%)	
	350nm	560nm	350nm	560nm	350nm	560nm
C1			0,159	0,071	64,90	75,00
C2			0,096	0,035	78,81	87,68
C3			0,051	0,029	88,74	89,79
C4			0,045	0,017	90,07	94,01
C5			0,042	0,010	90,73	94,48
C6			0,044	0,011	90,29	96,13
C7			0,053	0,013	88,30	95,42
C8			0,044	0,012	90,29	95,77
C9			0,040	0,008	91,17	97,18
C10	0,453	0,284	0,158	0,069	65,12	75,70
C11			0,091	0,030	79,91	89,44
C12			0,048	0,026	89,40	90,85
C13			0,041	0,015	90,95	94,72
C14			0,038	0,009	91,61	96,83
C15			0,043	0,010	90,51	96,48
C16			0,050	0,011	88,96	96,13
C17			0,042	0,009	90,73	96,83
C18			0,035	0,006	92,27	97,89

**Ensayo preliminar 4:** Policloruro de aluminio 20% y poliácridamida aniónica 0,1%.

Absorbancia inicial: 350nm = 0,464.  
560nm = 0,239.

**Tabla 21.** Resultados del ensayo preliminar 4: policloruro de aluminio 20% y poliácridamida aniónica 0,1%.

Cód.	pH <sub>i</sub>	Temp. (°C)	Dosis (mg·L <sup>-1</sup> )		Vel. (rpm)	Índ. de Will-comb	Absorbancia final	
			Coagulación	Floculación			350nm	560nm
D1			40		75	8	0,093	0,031
D2	7,13	16,3	60		75	8	0,050	0,028
D3			80		75	10	0,043	0,017
D4			100		75	10	0,039	0,009
D5	7,10	16,7	120		75	10	0,045	0,010
D6			140		75	10	0,047	0,012
D7			60		40	10	0,051	0,030
D8	7,07	17,0	80		40	10	0,043	0,019
D9			100		40	10	0,040	0,011
D10			40	210	75	8	0,092	0,032
D11	7,05	17,5	60		75	8	0,051	0,030
D12			80		75	10	0,044	0,017
D13			100		75	10	0,040	0,010
D14	7,03	17,9	120		75	10	0,048	0,012
D15			140		75	10	0,048	0,013
D16			60		40	10	0,051	0,031
D17	7,00	18,4	80		40	10	0,046	0,021
D18			100		40	10	0,042	0,013

La tabla 21 muestra que en el ensayo preliminar 4, se mantuvo constante la velocidad de coagulación a 210 rpm, se probaron seis diferentes dosis de policloruro de aluminio 20% cada una con dos diferentes dosis de poliacrilamida aniónica al 0,1%: 3 y 5 mg·L<sup>-1</sup>, y dos velocidades de floculación: 40 rpm y 75 rpm. Concluyéndose que el mejor tratamiento fue adicionar

100 mg·L<sup>-1</sup> de policloruro de aluminio 20% al ejercerse la velocidad de coagulación de 210 rpm, agregando 5 mg·L<sup>-1</sup> de poliacrilamida aniónica al 0,1% a una velocidad de floculación de 75 rpm, ya que dio como resultado un porcentaje de reducción de 91,59% de absorbancia a 350nm y 96,23% a 560nm, como lo prueba la tabla 22 en el tratamiento “D4”.

**Tabla 22.** Porcentajes de remoción del ensayo preliminar 4: policloruro de aluminio 20% y poliacrilamida aniónica 0,1%.

Código	Absorbancia inicial		Absorbancia final		Porcentaje de reducción (%)	
	350nm	560nm	350nm	560nm	350nm	560nm
D1			0,093	0,031	79,96	87,03
D2			0,050	0,028	89,22	88,28
D3			0,043	0,017	90,73	92,89
D4			0,039	0,009	91,59	96,23
D5			0,045	0,010	90,30	95,82
D6			0,047	0,012	89,87	94,98
D7			0,051	0,030	89,01	87,45
D8			0,043	0,019	90,73	92,05
D9			0,040	0,011	91,38	95,40
D10	0,464	0,239	0,092	0,032	80,17	86,61
D11			0,051	0,030	89,01	87,45
D12			0,044	0,017	90,52	92,89
D13			0,040	0,010	91,38	95,82
D14			0,048	0,012	89,66	94,98
D15			0,048	0,013	89,66	94,56
D16			0,051	0,031	89,01	87,03
D17			0,046	0,021	90,09	91,21
D18			0,042	0,013	90,95	94,56

Entonces al comparar el tratamiento preliminar 3 y el tratamiento preliminar 4, se puede concluir que el mejor tratamiento fue el “D4” con los siguientes parámetros: el coagulante policloruro de aluminio al 20% con la dosis 100 mg·L<sup>-1</sup> a 210 rpm y el floculante poliacrilamida aniónica 0,1% con la dosis 5 mg·L<sup>-1</sup> y la velocidad de floculación en 75 rpm. Así, estos parámetros se tomaron en cuenta en los tratamientos finales 3 y 4.

**Ensayo preliminar 5: Sulfato de aluminio 1,5% y almidón gelatinizado 0,3%**

Absorbancia inicial: 350nm = 0,470.  
560nm = 0,256.

**Tabla 23.** Resultados del ensayo preliminar 5: sulfato de aluminio 1,5% y almidón gelatinizado 0,3%.

Cód.	pH <sub>i</sub>	Temp. (°C)	Dosis (mg·L <sup>-1</sup> )		Vel. (rpm)		Índ. de Willcomb	Absorbancia final	
			Coagulación	Floculación	Coagulación	Floculación		350nm	560nm
E1				30	40		2	0,343	0,142
E2	6,91	16,5		150	40		6	0,301	0,109
E3				300	40		6	0,177	0,097
E4				270	40		6	0,186	0,076
E5	6,96	16,7		300	40		6	0,175	0,075
E6				330	40		6	0,171	0,071
E7				360	40		8	0,166	0,056
E8	6,99	17,1		420	40		8	0,130	0,045
E9				480	40		8	0,138	0,050
E10			225	210	30	75	2	0,392	0,150
E11	7,03	17,5		150	75		6	0,302	0,124
E12				300	75		8	0,179	0,102
E13				270	75		6	0,186	0,080
E14	7,06	17,8		300	75		8	0,177	0,077
E15				330	75		8	0,175	0,074
E16				360	75		8	0,169	0,059
E17	7,10	18,0		420	75		10	0,134	0,046
E18				480	75		8	0,142	0,050

La tabla 23 exhibe que se mantuvo constante la dosis de coagulante en 225 mg·L<sup>-1</sup> y la velocidad de coagulación en 210 rpm, se probaron ocho diferentes dosis de almidón gelatinizado 0,3% cada una con dos diferentes velocidades de floculación: 40 rpm y 75 rpm. Así, como muestra la tabla 24 en el tratamiento “E8”, la mejor dosis

de floculante para 225 mg·L<sup>-1</sup> de sulfato de aluminio al 1,5% al ejercerse la velocidad de coagulación de 210 rpm, fue agregar 420 mg·L<sup>-1</sup> de almidón gelatinizado al 0,3% con una velocidad de floculación de 40 rpm ya que dio como resultado un porcentaje de reducción de 72,34% de absorbancia a 350nm y 82,42% a 560nm.

**Tabla 24.** Porcentajes de remoción del ensayo preliminar 5: sulfato de aluminio 1,5% y almidón gelatinizado 0,3%.

Código	Absorbancia inicial		Absorbancia final		Porcentaje de reducción (%)	
	350nm	560nm	350nm	560nm	350nm	560nm
E1			0,343	0,142	27,02	44,53
E2			0,301	0,109	35,96	57,42
E3			0,177	0,097	62,34	62,11
E4			0,186	0,076	60,43	70,31
E5			0,175	0,075	62,77	70,70
E6			0,171	0,071	63,62	72,27
E7			0,166	0,056	64,68	78,13
E8			0,130	0,045	72,34	82,42
E9			0,138	0,050	70,64	80,47
E10	0,470	0,256	0,392	0,150	16,60	41,41
E11			0,302	0,124	35,74	51,56
E12			0,179	0,102	61,91	60,16
E13			0,186	0,080	60,43	68,75
E14			0,177	0,077	62,34	69,92
E15			0,175	0,074	62,77	71,09
E16			0,169	0,059	64,04	76,95
E17			0,134	0,046	71,49	82,03
E18			0,142	0,050	69,79	80,47

Entonces al analizar el tratamiento “E8”, se puede concluir que los mejores parámetros son los siguientes: el coagulante sulfato de aluminio al 1,5% con la dosis 225 mg·L<sup>-1</sup> a 210 rpm y el floculante almidón gelatinizado al 0,3% con la dosis 420 mg·L<sup>-1</sup> y la velocidad de floculación en 40 rpm.

Así, estos parámetros se tomaron en cuenta en el tratamiento final 5 (tabla 24).

#### Ensayo preliminar 6: Policloruro de aluminio 20% y almidón gelatinizado 0,3%

Absorbancia inicial: 350nm = 0,468.  
560nm = 0,271.

**Tabla 25.** Resultados del ensayo preliminar 6: policloruro de aluminio 20% y almidón gelatinizado 0,3%.

Cód.	pHi	Temp. (°C)	Dosis (mg·L <sup>-1</sup> ) Vel. (rpm)		Índ. de Willcomb	Absorbancia final		
			Coagulación	Floculación		350nm	560nm	
F1				30	40	2	0,369	0,208
F2	6,99	16,6		150	40	4	0,101	0,071
F3				300	40	8	0,042	0,015
F4				90	40	4	0,070	0,040
F5	7,04	16,9		120	40	6	0,064	0,039
F6				150	40	8	0,050	0,025
F7				180	40	8	0,043	0,016
F8	7,10	17,3		210	40	10	0,032	0,007
F9				240	40	10	0,037	0,010
F10			100	30	75	2	0,322	0,210
F11	7,15	17,9		150	75	4	0,098	0,070
F12				300	75	8	0,040	0,014
F13				90	75	4	0,066	0,040
F14	7,17	18,2		120	75	6	0,060	0,037
F15				150	75	8	0,044	0,022
F16				180	75	8	0,040	0,010
F17	7,22	18,4		210	75	10	0,030	0,006
F18				240	75	10	0,035	0,009

Como se observa en la tabla 25, se mantuvo constante la dosis de coagulante y la velocidad de coagulación, se probaron 9 diferentes dosis de almidón gelatinizado 0,3% cada una con dos diferentes velocidades de floculación: 40 rpm y 75 rpm.

Concluyéndose que la mejor dosis de floculante para 100 mg·L<sup>-1</sup> de policloruro de aluminio 20% al ejercerse la velocidad de coagulación de 210 rpm, fue agregar 240 mg·L<sup>-1</sup> de almidón gelatinizado al 0,3% con una velocidad de floculación de 75 rpm ya que dio como resultado un porcentaje de reducción de 92,52% de absorbancia

a 350nm y 96,68% a 560nm en el tratamiento “F18” (Tabla 26).

Entonces al analizar el tratamiento “F18”, se puede concluir que los mejores parámetros son los siguientes: el coagulante policloruro de aluminio al 20% con la dosis 100 mg·L<sup>-1</sup> a 210 rpm y el floculante almidón gelatinizado al 0,3% con la dosis 240 mg·L<sup>-1</sup> y la velocidad de floculación en 75 rpm.

Así, estos parámetros se tomaron en cuenta en el tratamiento final 6.

**Tabla 26.** Porcentajes de remoción del ensayo preliminar 6: policloruro de aluminio 20% y almidón gelatinizado 0,3%.

Código	Absorbancia inicial		Absorbancia final		Porcentaje de reducción (%)	
	350nm	560nm	350nm	560nm	350nm	560nm
F1			0,369	0,208	21,15	23,25
F2			0,101	0,071	78,42	73,89
F3			0,042	0,015	91,03	94,46
F4			0,070	0,040	85,04	85,24
F5			0,064	0,039	86,32	85,61
F6			0,050	0,025	89,32	90,77
F7			0,043	0,016	90,81	94,10
F8			0,032	0,007	93,16	97,42
F9			0,037	0,010	92,09	96,31
F10	0,468	0,271	0,322	0,210	31,20	22,51
F11			0,098	0,070	79,06	74,17
F12			0,040	0,014	91,45	94,83
F13			0,066	0,040	85,90	85,24
F14			0,060	0,037	87,18	86,35
F15			0,044	0,022	90,60	91,88
F16			0,040	0,010	91,45	96,31
F17			0,030	0,006	93,59	97,79
F18			0,035	0,009	92,52	96,68

Pruebas finales considerando los parámetros: turbidez y demanda química de oxígeno

En todas las pruebas finales se caracterizó la muestra inicial de efluente industrial no doméstico de la industria alimentaria, en los parámetros: absorbancia, turbidez, pH, temperatura y DQO, como se observa en la tabla 27.

Ensayo final 1: Sulfato de aluminio 1,5% y poliacrilamida aniónica 0,1%

**Tabla 27.** Características de la muestra inicial del efluente industrial no doméstico de la industria alimentaria para el ensayo final 1.

Parámetro	Valor
Absorbancia inicial:	350nm = 0,515 560nm = 0,303
Turbidez inicial:	587 NTU
pH inicial:	6,67
Temperatura inicial:	16,1°C
DQO inicial:	1803 mg·L <sup>-1</sup>

**Tabla 28.** Resultados del ensayo final 1: sulfato de aluminio 1,5% y poliacrilamida aniónica 0,1%.

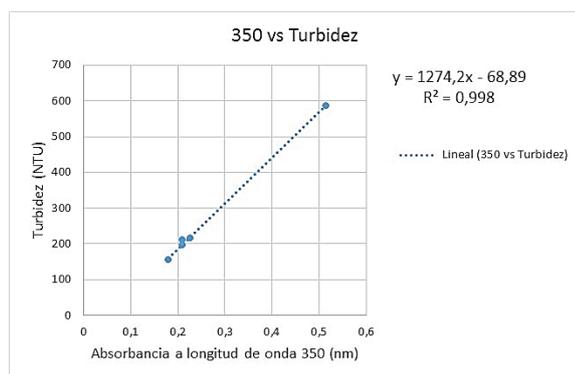
Cód.	Coagulación		Floculación		Absorbancia final		Turbidez final (NTU)	DQO final (mg·L <sup>-1</sup> )
	Dosis (mg·L <sup>-1</sup> )	Vel. (rpm)	Dosis (mg·L <sup>-1</sup> )	Vel. (rpm)	350nm	560nm		
D1M1	232,5	210	3	75	0,226	0,088	215	NA
D1M1								
D1M1								
D1M2	240,0	210	3	75	0,210	0,078	211	NA
D1M2								
D1M2								
D1M3	247,5	210	3	75	0,210	0,080	195	NA
D1M3								
D1M3								
D1M4	255,0	210	3	75	0,186	0,067	155	651
D1M4								
D1M4								

**Tabla 29.** Porcentajes de remoción y reducción del ensayo final 1: sulfato de aluminio 1,5% y poliacrilamida aniónica 0,1%.

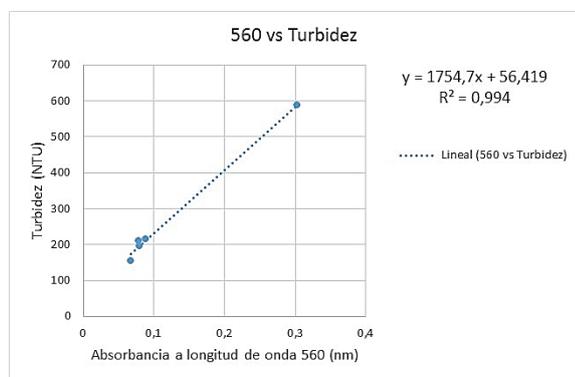
Cód.	Absorbancia final		Porcentaje de reducción (%)		Turbidez final (NTU)	Porcentaje de remoción (%)	DQO final (mg·L <sup>-1</sup> )	Porcentaje de reducción (%)
	350nm	560nm	350nm	560nm				
D1M1	0,226	0,088	56,12	70,96	215	63,37	NA	NA
D1M1								
D1M1								
D1M2	0,210	0,078	59,22	74,26	211	64,05	NA	NA
D1M2								
D1M2								
D1M3	0,209	0,080	59,22	73,60	195	66,78	NA	NA
D1M3								
D1M3								
D1M4	0,180	0,067	63,88	77,89	155	73,59	651	63,89
D1M4								
D1M4								

La tabla 28 exhibe que en el ensayo final 1, se mantuvo constante la velocidad de coagulación en 210 rpm, la dosis de floculante en 3 mg·L<sup>-1</sup> y la velocidad de floculación en 75 rpm, y se probaron cuatro diferentes dosis de sulfato de aluminio al 1,5%. Así, como exhibe la tabla 29 en el tratamiento “D1M4”, la mejor dosis de coagulante fue al adicionar 255 mg·L<sup>-1</sup> de sulfato de aluminio al 1,5%. Resultando un porcentaje de remoción de 73,59% de turbidez y 63,89% de reducción de demanda química

de oxígeno. Por otro lado, al analizar las figuras 4 y 5, donde se muestran las regresiones de la absorbancia con la turbidez para la longitud de onda 350nm y 560 nm, se exhibe que el valor de R<sup>2</sup> en el caso de la longitud de onda 350nm se encuentra más cercano a la unidad. En otras palabras, existe una asociación lineal casi perfecta entre la absorbancia a 350nm y la turbidez (NTU) del efluente industrial.



**Figura 4.** Comparación de la absorbancia a 350nm con la turbidez en el ensayo final 1: sulfato de aluminio 1,5% y poliacrilamida aniónica 0,1%.



**Figura 5.** Comparación de la absorbancia a 560nm con la turbidez en el ensayo final 1: sulfato de aluminio 1,5% y poliacrilamida aniónica 0,1%

**Ensayo final 2: Sulfato de aluminio 1,5% y poliacrilamida aniónica 0,1%**

Las características del efluente industrial son señaladas en la tabla 30.

**Tabla 30.** Características de la muestra inicial del efluente industrial no doméstico de la industria alimentaria para el ensayo final 2.

Parámetro	Valor
Absorbancia inicial:	350nm = 0,475 560nm = 0,282
Turbidez inicial:	536 NTU
pH inicial:	6,82
Temperatura inicial:	16,8°C
DQO inicial:	1743 mg·L <sup>-1</sup>

**Tabla 31.** Resultados del ensayo final 2 para sulfato de aluminio 1,5% y poliacrilamida aniónica 0,1%.

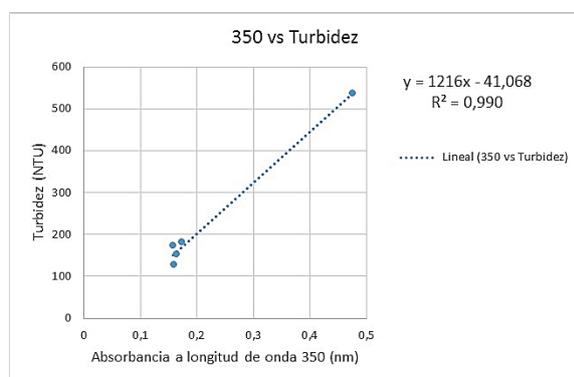
Cód.	Coagulación Dosis (mg·L <sup>-1</sup> )	Coagulación Vel. (rpm)	Floculación Dosis (mg·L <sup>-1</sup> )	Floculación Vel. (rpm)	Absorbancia final 350nm	Absorbancia final 560nm	Turbidez final (NTU)	DQO final (mg·L <sup>-1</sup> )
D2M1	232,5	210	5	75	0,174	0,045	181	NA
D2M1								
D2M2								
D2M2								
D2M2	240,0	210	5	75	0,160	0,033	173	NA
D2M3								
D2M3	247,5	210	5	75	0,158	0,030	153	NA
D2M3								
D2M4	255,0	210	5	75	0,164	0,019	127	586
D2M4								

**Tabla 32.** Porcentajes de remoción y reducción del ensayo final 2: sulfato de aluminio 1,5% y poliacrilamida aniónica 0,1%.

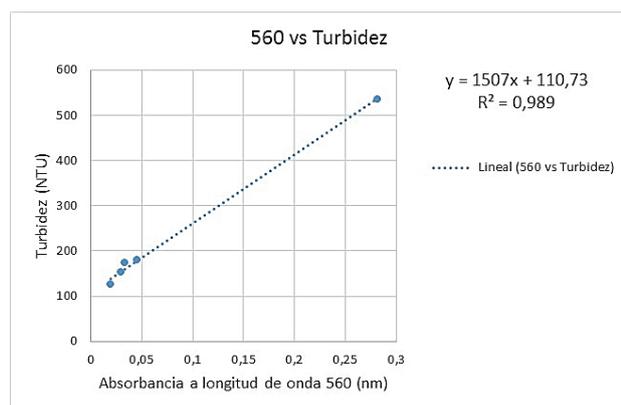
Cód.	Absorbancia final 350nm	Absorbancia final 560nm	Porcentaje de reducción (%) 350nm	Porcentaje de reducción (%) 560nm	Turbidez final (NTU)	Porcentaje de remoción (%)	DQO final (mg·L <sup>-1</sup> )	Porcentaje de reducción (%)
D2M1	0,174	0,045	63,37	84,04	181	66,23	NA	NA
D2M1								
D2M2	0,160	0,033	66,32	88,30	173	67,72	NA	NA
D2M2								
D2M3	0,164	0,030	66,74	89,36	153	71,46	NA	NA
D2M3								
D2M4	0,158	0,019	65,47	93,26	127	76,31	586	66,38
D2M4								

La tabla 31 exhibe que en el ensayo final 2, se mantuvo constante la velocidad de coagulación en 210 rpm, la dosis de floculante en 5 mg·L<sup>-1</sup> y la velocidad de floculación en 75 rpm y se probaron 4 diferentes dosis de sulfato de aluminio al 1,5%. Así, como muestra la tabla 32 en el tratamiento “D2M4” la mejor dosis de coagulante fue adicionando 255 mg·L<sup>-1</sup> de sulfato de aluminio al 1,5%. Ya que, dio como resultado un porcentaje de remoción de 76,31% de turbidez y 66,38% de demanda química de oxígeno. Entonces, al comparar la tabla 29 y la tabla 32, se puede concluir que la mejor dosis de sulfato de aluminio al 1,5% es 255 mg·L<sup>-1</sup> al adicionarle 5 mg·L<sup>-1</sup>, en vez de 3 mg·L<sup>-1</sup> de poliacrilamida aniónica al 0,1%, así lo demuestra el tratamiento “D2M4”. Ahora bien, al analizar las figuras 6 y 7, donde se muestran las regresiones de la absorbancia con la turbidez para la longitud de onda 350nm y 560 nm, se exhibe que el valor de R<sup>2</sup> en el caso de la longitud de onda 350nm se encuentra más cercano

a la unidad. En otras palabras, existe una asociación lineal casi perfecta entre la absorbancia a 350nm y la turbidez (NTU) del effluente industrial.



**Figura 6.** Comparación de la absorbancia a 350nm con la turbidez, en el ensayo final 2: sulfato de aluminio 1,5% y poliacrilamida aniónica 0,1%.



**Figura 7.** Comparación de la absorbancia a 560nm con la turbidez en el ensayo final 2: sulfato de aluminio 1,5% y poliacrilamida aniónica 0,1%.

### Ensayo final 3: Policloruro de aluminio 20% y poliacrilamida aniónica 0,1%

Las características del effluente industrial son indicadas en la tabla 33.

**Tabla 33.** Características de la muestra inicial del effluente industrial no doméstico de la industria alimentaria para el ensayo final 3.

Parámetro	Valor
Absorbancia inicial:	350nm = 0,488 560nm = 0,303
Turbidez inicial:	572 NTU
pH inicial:	6,82
Temperatura inicial:	16,9°C
DQO inicial:	1755 mg·L <sup>-1</sup>

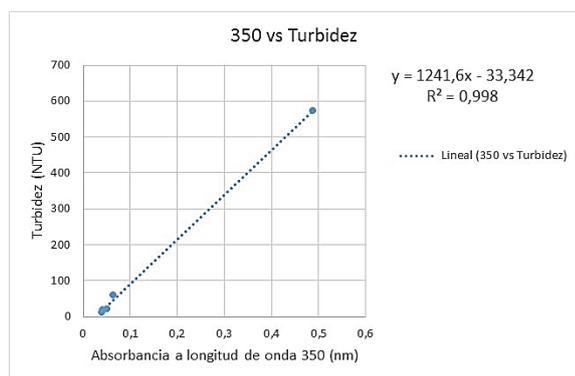
**Tabla 34.** Resultados del ensayo final 3 para policloruro de aluminio 20% y poliacrilamida aniónica 0,1%.

Cód.	Coagulación		Floculación		Absorbancia final		Turbidez final (NTU)	DQO final (mg·L <sup>-1</sup> )
	Dosis (mg·L <sup>-1</sup> )	Vel. (rpm)	Dosis (mg·L <sup>-1</sup> )	Vel. (rpm)	350nm	560nm		
D3M1	60	210	3	75	0,064	0,035	60,6	NA
D3M1								
D3M2					0,051	0,012	21,7	NA
D3M2								
D3M3	100				0,040	0,007	11,4	314
D3M3								
D3M4	120				0,042	0,010	18,1	NA
D3M4								

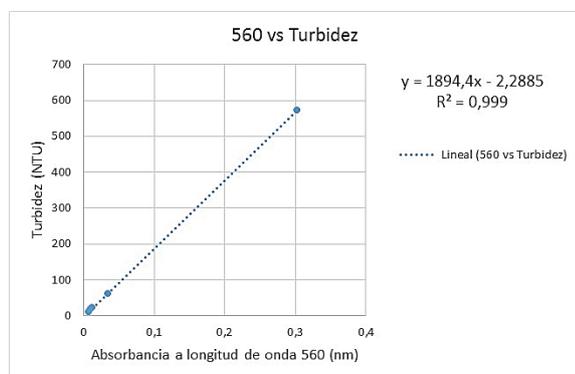
**Tabla 35.** Porcentajes de remoción y reducción del ensayo final 3: policloruro de aluminio 20% y poliacrilamida aniónica 0,1%.

Cód.	Absorbancia final		Porcentaje de reducción (%)		Turbidez final (NTU)	Porcentaje de remoción (%)	DQO final (mg·L <sup>-1</sup> )	Porcentaje de reducción (%)								
	350nm	560nm	350nm	560nm												
D3M1	0,064	0,035	86,89	88,45	60,6	89,41	NA	NA								
D3M1																
D3M2									0,051	0,012	89,55	96,04	21,7	96,21	NA	NA
D3M2																
D3M3	0,040	0,007	91,80	97,69	11,4	98,01	314	82,11								
D3M3																
D3M4	0,042	0,010	91,39	96,70	18,1	96,84	NA	NA								
D3M4																

En la tabla 34 se observa que en el ensayo final 3, se mantuvo constante la velocidad de coagulación en 210 rpm, la dosis de floculante en 3 mg·L<sup>-1</sup> y la velocidad de floculación en 75 rpm y se probaron cuatro diferentes dosis de policloruro de aluminio. Así, como se demuestra en la tabla 35 en el tratamiento “D3M3”, la mejor dosis de coagulante fue adicionando 120 mg·L<sup>-1</sup> de policloruro de aluminio al 20%. Ya que dio como resultado un porcentaje de remoción de 98,01% de turbidez y 82,11% de demanda química de oxígeno. Ahora bien, al analizar las figuras 8 y 9, donde se muestran las regresiones de la absorbancia con la turbidez para la longitud de onda 350nm y 560 nm, se exhibe que el valor de R<sup>2</sup> en el caso de la longitud de onda 560nm se encuentra más cercano a la unidad. En otras palabras, existe una asociación lineal casi perfecta entre la absorbancia a 560nm y la turbidez (NTU) del effluente industrial.



**Figura 8.** Comparación de la absorbancia a 350nm con la turbidez, en el ensayo final 3: policloruro de aluminio 20% y poliacrilamida aniónica 0,1%.



**Figura 9.** Comparación de la absorbancia a 560nm con la turbidez en el ensayo final 3: policloruro de aluminio 20% y poliacrilamida aniónica 0,1%.

Ensayo final 4: Policloruro de aluminio 20% y poliacrilamida aniónica 0,1%

Las características del efluente industrial se muestran en la tabla 36.

**Tabla 36.** Características de la muestra inicial del efluente industrial no doméstico de la industria alimentaria para el ensayo final 4.

Parámetro	Valor
Absorbancia inicial:	350nm = 0,502 560nm = 0,295
Turbidez inicial:	576 NTU
pH inicial:	7,03
Temperatura inicial:	17,0°C
DQO inicial:	1794 mg·L <sup>-1</sup>

**Tabla 37.** Resultados del ensayo final 4 para policloruro de aluminio 20% y poliacrilamida aniónica 0,1%.

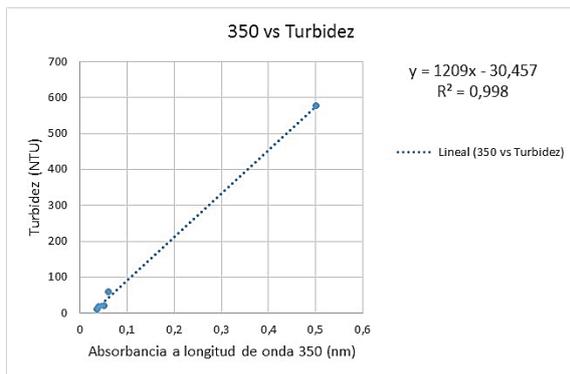
Cód.	Coagulación		Floculación		Absorbancia final		Turbidez final (NTU)	DQO final (mg·L <sup>-1</sup> )
	Dosis (mg·L <sup>-1</sup> )	Vel. (rpm)	Dosis (mg·L <sup>-1</sup> )	Vel. (rpm)	350nm	560nm		
D4M1								
D4M1	60				0,060	0,029	58,9	NA
D4M1								
D4M2								
D4M2	80				0,052	0,010	20,2	NA
D4M2								
D4M3		210	5	75				
D4M3	100				0,037	0,005	10,3	304
D4M3								
D4M4								
D4M4	120				0,040	0,009	17,7	NA
D4M4								

**Tabla 38.** Porcentajes de remoción y reducción del ensayo final 4: policloruro de aluminio 20% y poliacrilamida aniónica 0,1%.

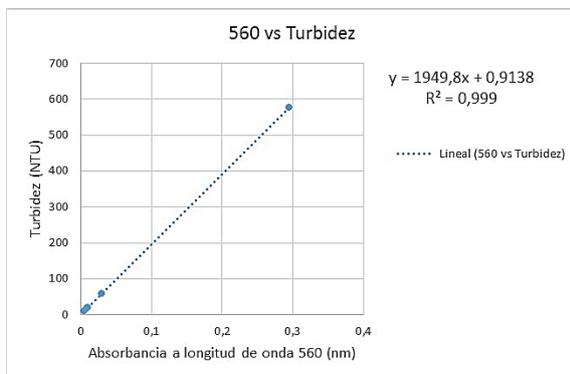
Cód.	Absorbancia final		Porcentaje de reducción (%)		Turbidez final (NTU)	Porcentaje de remoción (%)	DQO final (mg·L <sup>-1</sup> )	Porcentaje de reducción (%)
	350nm	560nm	350nm	560nm				
D4M1								
D4M1	0,060	0,029	88,05	90,17	58,9	89,77	NA	NA
D4M1								
D4M2								
D4M2	0,052	0,010	89,64	96,61	20,2	96,49	NA	NA
D4M2								
D4M3								
D4M3	0,037	0,005	92,63	96,61	10,3	98,21	304	83,05
D4M3								
D4M4								
D4M4	0,040	0,009	92,03	96,95	17,7	96,93	NA	NA
D4M4								

La tabla 37 exhibe que, se mantuvo constante la velocidad de coagulación en 210 rpm, la dosis de floculante en 5 mg·L<sup>-1</sup> y la velocidad de floculación en 75 rpm y se probaron cuatro diferentes dosis de policloruro de aluminio 20%. Así, en la tabla 38 se observa en el tratamiento “D4M3” que la mejor dosis de coagulante fue adicionando 100 mg·L<sup>-1</sup> de policloruro de aluminio al 20%. Ya que dio como resultado un porcentaje de remoción de 98,21% de turbidez y 83,05% de demanda química de oxígeno. Entonces, al comparar la tabla 35 y la tabla 38, se puede concluir que la mejor dosis de policloruro de aluminio

al 20% es 100 mg·L<sup>-1</sup> al adicionarle 5 mg·L<sup>-1</sup>, en vez de 3 mg·L<sup>-1</sup> de poliacrilamida aniónica al 0,1%, así lo demuestra el tratamiento “D4M3”. Al analizar las figuras 10 y 11, se muestran las regresiones de la absorbancia con la turbidez para la longitud de onda 350nm y 560 nm, se exhibe que el valor de R<sup>2</sup> en el caso de la longitud de onda 560nm se encuentra más cercano a la unidad. En otras palabras, existe una asociación lineal casi perfecta entre la absorbancia a 560nm y la turbidez (NTU) del effluente industrial.



**Figura 10.** Comparación de la absorbancia a 350nm con la turbidez, en el ensayo final 4: policloruro de aluminio 20% y poliacrilamida aniónica 0,1%.



**Figura 11.** Comparación de la absorbancia a 560nm con la turbidez en el ensayo final 4: policloruro de aluminio 20% y poliacrilamida aniónica 0,1%.

#### Ensayo final 5: Sulfato de aluminio 1,5% y almidón gelatinizado 0,3%

La tabla 39 indica las características del effluente industrial.

**Tabla 39.** Características de la muestra inicial del effluente industrial no doméstico de la industria alimentaria para el ensayo final 5.

Parámetro	Valor
Absorbancia inicial:	350nm = 0,521
	560nm = 0,311
Turbidez inicial:	590 NTU
pH inicial:	6,67
Temperatura inicial:	16,1°C
DQO inicial:	1814 mg·L <sup>-1</sup>

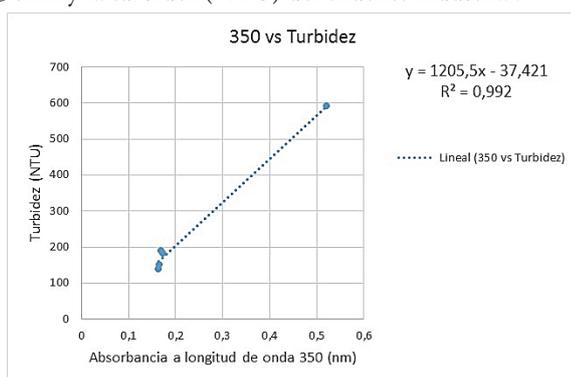
**Tabla 40.** Resultados del ensayo final 5 para sulfato de aluminio 1,5% y almidón gelatinizado 0,3%.

Cód.	Coagulación		Floculación		Absorbancia final		Turbidez final (NTU)	DQO final (mg·L <sup>-1</sup> )
	Dosis (mg·L <sup>-1</sup> )	Vel. (rpm)	Dosis (mg·L <sup>-1</sup> )	Vel. (rpm)	350nm	560nm		
D5M1								
D5M1			450	40	0,173	0,070	182	NA
D5M1	225							
D5M2								
D5M2			420	75	0,170	0,071	190	NA
D5M2	210							
D5M3								
D5M3			450	40	0,164	0,019	139	624
D5M3	255							
D5M4								
D5M4			420	75	0,165	0,019	150	NA
D5M4								

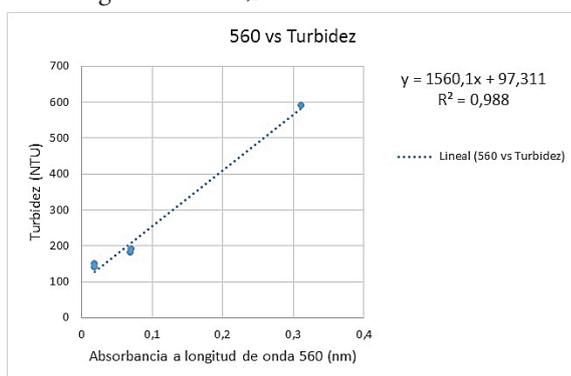
**Tabla 41.** Porcentajes de remoción y reducción del ensayo final 5: sulfato de aluminio 1,5% y almidón gelatinizado 0,3%.

Cód.	Absorbancia final		Porcentaje de reducción (%)		Turbidez final (NTU)	Porcentaje de remoción (%)	DQO final (mg·L <sup>-1</sup> )	Porcentaje de reducción (%)
	350nm	560nm	350nm	560nm				
D5M1								
D5M1	0,173	0,070	66,79	77,49	182	69,15	NA	NA
D5M1								
D5M2								
D5M2	0,170	0,071	67,37	77,17	190	67,80	NA	NA
D5M2								
D5M3								
D5M3	0,164	0,019	68,52	93,89	139	76,44	624	65,60
D5M3								
D5M4								
D5M4	0,165	0,019	68,33	93,89	150	74,58	NA	NA
D5M4								

En la tabla 40 se observa que en el ensayo final 5, se mantuvo constante la velocidad de coagulación en 210 rpm, se probaron dos diferentes dosis de sulfato de aluminio al 1,5%: 225 mg·L<sup>-1</sup> y 255 mg·L<sup>-1</sup>, cada una con dos dosis de almidón gelatinizado al 0,3%: 420 mg·L<sup>-1</sup> y 450 mg·L<sup>-1</sup> actuando a dos velocidades de floculación: 40 rpm y 75 rpm. Así en la tabla 41 en el tratamiento “D5M3” se exhibe que la mejor dosis de coagulante al ejercerse la velocidad de 210 rpm, agregándose 450 mg·L<sup>-1</sup> de almidón gelatinizado al 0,3% con una velocidad de floculación de 40 rpm, fue adicionando 255 mg·L<sup>-1</sup> de sulfato de aluminio al 1,5%. Ya que dio como resultado un porcentaje de remoción de 76,44% de turbidez y 65,60% de demanda química de oxígeno. Ahora bien, al analizar las figuras 12 y 13, donde se muestran las regresiones de la absorbancia con la turbidez para la longitud de onda 350nm y 560 nm, se exhibe que el valor de R<sup>2</sup> en el caso de la longitud de onda 350nm se encuentra más cercano a la unidad. En otras palabras, existe una asociación lineal casi perfecta entre la absorbancia a 350nm y la turbidez (NTU) del efluente industrial.



**Figura 12.** Comparación de la absorbancia a 350nm con la turbidez, en el ensayo final 5: sulfato de aluminio 1,5% y almidón gelatinizado 0,3%.



**Figura 13.** Comparación de la absorbancia a 560nm con la turbidez en el ensayo final 5: sulfato de aluminio 1,5% y almidón gelatinizado 0,3%.

**Ensayo final 6: Policloruro de aluminio 20% y almidón gelatinizado 0,3%**

La tabla 42 señala las características del efluente industrial.

**Tabla 42.** Características de la muestra inicial del efluente industrial no doméstico de la industria alimentaria para el ensayo final 6.

Parámetro	Valor
Absorbancia inicial:	350nm = 0,481
	560nm = 0,269
Turbidez inicial:	553 NTU
pH inicial:	6,67
Temperatura inicial:	16,1°C
DQO inicial:	1766 mg·L <sup>-1</sup>

**Tabla 43.** Resultados del ensayo final 6 para policloruro de aluminio 20% y almidón gelatinizado 0,3%.

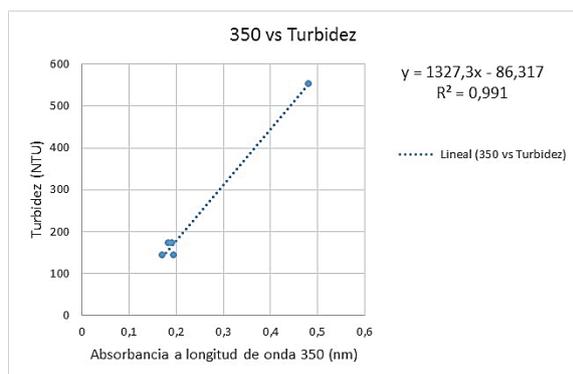
Cód.	Dosis (mg·L <sup>-1</sup> )		Vel. (rpm)		Absorbancia final		Turbidez final (NTU)	DQO final (mg·L <sup>-1</sup> )
	Coagulación	Floculación	350nm	560nm				
D6M1		240	40					
D6M1		240	40	0,191	0,072	173,9	NA	
D6M1	80	240	40					
D6M2		270	75					
D6M2		270	75	0,194	0,079	144,1	NA	
D6M2	210	270	75					
D6M3		240	40					
D6M3		240	40	0,184	0,041	173,9	NA	
D6M3	100	240	40					
D6M4		270	75					
D6M4		270	75	0,171	0,023	144,1	606	
D6M4		270	75					

**Tabla 44.** Porcentajes de remoción y reducción del ensayo final 5: policloruro de aluminio 20% y almidón gelatinizado 0,3%.

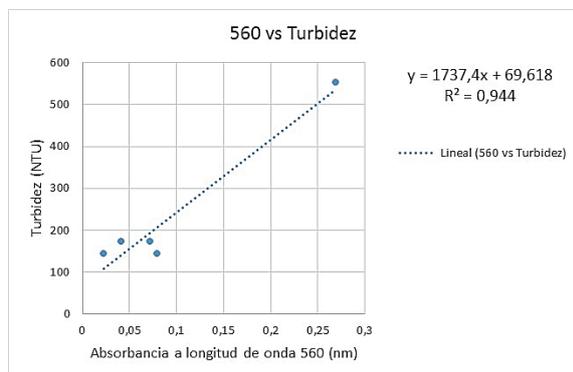
Cód.	Absorbancia final		Porcentaje de reducción (%)		Turbidez final (NTU)	Porcentaje de remoción (%)	DQO final (mg·L <sup>-1</sup> )	Porcentaje de reducción (%)
	350nm	560nm	350nm	560nm				
D6M1								
D6M1	0,191	0,072	60,29	73,23	173,9	68,55	NA	NA
D6M1								
D6M2								
D6M2	0,194	0,079	59,67	70,63	144,1	73,94	NA	NA
D6M2								
D6M3								
D6M3	0,184	0,041	61,75	84,76	173,9	68,55	NA	NA
D6M3								
D6M4								
D6M4	0,171	0,023	64,45	91,45	144,1	73,94	606	65,69
D6M4								

En la tabla 43 se observa que en el ensayo final 6, se mantuvo constante la velocidad de coagulación, se probaron dos diferentes dosis de policloruro de aluminio

20%: 80 mg·L<sup>-1</sup> y 100 mg·L<sup>-1</sup> cada una con dos dosis de almidón gelatinizado al 0,3%: 240 mg·L<sup>-1</sup> y 270 mg·L<sup>-1</sup> actuando a 2 velocidades de floculación: 40 rpm y 75 rpm. Así, la tabla 44 demuestra en el tratamiento “D6M4” que la mejor dosis de coagulante al ejercerse la velocidad de coagulación de 210 rpm, agregándose 270 mg·L<sup>-1</sup> de almidón gelatinizado al 0,3% con una velocidad de floculación de 75 rpm, fue adicionando 100 mg·L<sup>-1</sup> de policloruro de aluminio al 20%. Ya que dio como resultado un porcentaje de remoción de 73,94% de turbidez y 65,69% de demanda química de oxígeno. Ahora bien, al analizar las figuras 14 y 15, donde se muestran las regresiones de la absorbancia con la turbidez para la longitud de onda 350nm y 560 nm, se exhibe que el valor de R<sup>2</sup> en el caso de la longitud de onda 350nm se encuentra más cercano a la unidad. En otras palabras, existe una asociación lineal casi perfecta entre la absorbancia a 350nm y la turbidez (NTU) del efluente industrial.

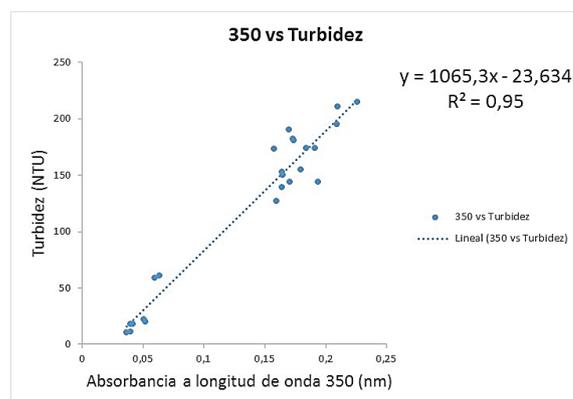


**Figura 14.** Comparación de la absorbancia a 350nm con la turbidez, en el ensayo final 6: policloruro de aluminio 20% y almidón gelatinizado 0,3%.

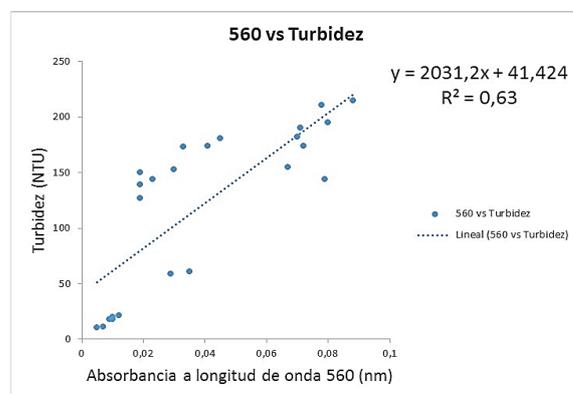


**Figura 15.** Comparación de la absorbancia a 560nm con la turbidez en el ensayo final 6: policloruro de aluminio 20% y almidón gelatinizado 0,3%.

#### Comparación de la absorbancia con la turbidez de todos los ensayos finales



**Figura 16.** Comparación de la absorbancia a 350nm con la turbidez de todos los ensayos finales.

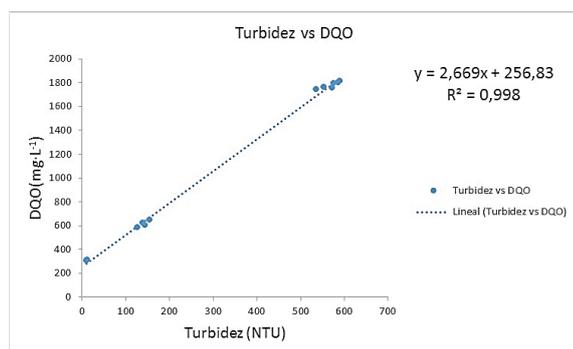


**Figura 17.** Comparación de la absorbancia a 560nm con la turbidez de todos los ensayos finales.

Debido a los diferentes resultados relacionando la absorbancia y la turbidez, se realizó una regresión de todos los datos finales de absorbancia con la longitud de onda 350nm (figura 16) y otra con todos los datos finales de absorbancia con la longitud de onda 560nm (figura 17). Esta vez sin considerar el valor inicial de la muestra de efluente, sólo con los resultados de cada tratamiento final. Se midió la absorbancia a 350nm y se realizó una regresión con los datos de turbidez (NTU) correspondientes. Se tomó como coeficiente de determinación a R cuadrado, el cual tuvo un valor de 0,94, indicando que existe una regresión lineal entre la absorbancia a 350nm y la turbidez (NTU) del efluente industrial. Se midió la absorbancia a 560nm y se realizó una regresión con los datos de turbidez (NTU) correspondientes. Donde R cuadrado tuvo un valor de 0,62, indicando que existe una regresión lineal débil entre la absorbancia a 560nm y la turbidez (NTU) del efluente industrial. Por ello, se consideró a la longitud de onda 350nm como la más adecuada para determinar la carga orgánica en el efluente industrial no doméstico de la industria alimentaria, según la turbidez.

### Comparación de la turbidez con la DQO de todos los ensayos finales

Para determinar la carga orgánica en el efluente industrial no doméstico de la industria alimentaria según la turbidez, se realizó una regresión entre los datos finales de la turbidez (NTU) y sus correspondientes datos de DQO ( $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$ ). Se tomó como coeficiente de determinación a  $R^2$ , el cual tuvo un valor de 0,99, indicando que existe una asociación lineal casi perfecta entre la turbidez y la DQO (Fig. 19).



**Figura 18.** Comparación de la turbidez con la DQO de todos los ensayos finales.

### DISCUSIÓN

Los parámetros óptimos en la prueba de jarras siempre se dieron con un pH cercano al neutro. Por su lado, los resultados de Cabrera *et al.* (2009), al tratar agua residual procedente de la etapa de degradación biológica de la planta de tratamiento de residuales de la Empresa Textil “Desembarco del Granma” de Villa Clara en Cuba, determinaron que las condiciones óptimas de operación correspondieron al uso de sulfato de aluminio a valor de  $\text{pH} = 7$  y dosis de  $40 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ . Para llegar a esa conclusión variaron el pH inicial de 4 a 9 unidades donde decidieron que no fue conveniente realizar el proceso de tratamiento químico-físico de coagulación-floculación a pH bajos, sino a pH cercanos a la neutralidad, además que este proceso fue favorecido con el incremento de la dosis de sulfato de aluminio, disminuyendo la turbidez con el correspondiente incremento del porcentaje de remoción. Acotaron también que el pH final disminuye ligeramente cuando se incrementa la dosis de coagulante respecto a cada valor de pH inicial. Considerando que ellas no utilizaron floculante, únicamente coagulante en sus experimentos, sus conclusiones apoyan nuestros resultados, ya que el pH de la muestra inicial al utilizar sulfato de aluminio siempre se encontró cercano a la neutralidad.

Al realizar la prueba de jarras usando como coagulante policloruro de aluminio y como floculante poliácridamida aniónica, los parámetros óptimos fueron: policloruro de aluminio a dosis de  $100 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$  y seguidamente sumando poliácridamida aniónica a dosis de  $5 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ , dejando la muestra tratada con un porcentaje de remoción de 98,21% de turbidez y un porcentaje de reducción de 83,05% de DQO. Valores considerablemente mejores que al utilizar sulfato de aluminio. Más aún, la dosis ideal de sulfato de aluminio fue  $255 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ , quedando en evidencia que al utilizar policloruro de aluminio se necesita menos de la mitad de esa dosis. Cogollo (2011) estudió el proceso de clarificación en sistemas de tratamiento de aguas industriales usando un coagulante inorgánico polimerizado (hidroxicloruro de aluminio o policloruro de aluminio), y mencionó que la utilización de los coagulantes más comunes como, por ejemplo, el sulfato de aluminio, se ha venido cuestionando en los últimos tiempos debido, entre otras causas, a la dificultad técnica para mantener estable el pH óptimo de coagulación durante la operación y su posible relación con la aparición de enfermedades neurodegenerativas.

Una de las opciones consideradas para alcanzar altos niveles de calidad del agua tratada y desempeño del proceso es el uso de los coagulantes alternativos que han surgido en las últimas décadas. Éstos, son una nueva generación de coagulantes inorgánicos prepolimerizados incluyendo policloruros de aluminio (PAC's), los cuales han mostrado un mejor desempeño que los coagulantes convencionales como el sulfato de aluminio, hoy en día, ampliamente aplicado para tratamiento de aguas residuales. También acotó que estos coagulantes alternativos son usados exitosamente en procesos de clarificación de aguas debido a su desempeño superior en la remoción de materia orgánica y partículas en suspensión y su capacidad de garantizar un proceso con mínima variación y menor costo que los coagulantes convencionales. Así, en el caso del tratamiento con sulfato de aluminio el porcentaje de reducción de DQO fue 66,38% a diferencia del tratamiento con policloruro de aluminio que tuvo un porcentaje de reducción de DQO de 83,05%, corroborando así una mejor eficiencia de este último para tratar aguas residuales industriales con alta carga orgánica.

Por otro lado, en estas pruebas se utilizó el floculante: poliácridamida aniónica “PAM”, tal como lo hicieron Aguilar *et al.* (2005) con agua residual industrial proveniente de mataderos. Ellos encontraron que la dosis ideal de la poliácridamida aniónica al reaccionar con sulfato de aluminio fue  $75 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ , mientras que al reaccionar con policloruro de aluminio fue  $20 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ , evidenciándose

que se necesita menos de la mitad de floculante cuando se utiliza el policloruro de aluminio. Al contrario, al tratar agua residual industrial proveniente de una industria alimentaria de salsa de soya, la cantidad de poliacrilamida aniónica utilizada con sulfato de aluminio y policloruro de aluminio varió entre 3 y 5 mg·L<sup>-1</sup>, mostrándose mejores resultados para ambos casos al utilizar 5 mg·L<sup>-1</sup> de dosis de este floculante. Adicionalmente, ellos concluyen que el uso de poliacrilamida aniónica incrementa la eficiencia de los coagulantes, incrementando la rapidez de sedimentación, reduciendo la cantidad de coagulante requerido para el tratamiento y minimizando el costo en el proceso de la coagulación-floculación.

En este trabajo de investigación se utilizó almidón de *S. tuberosum* como floculante al tratar un efluente de una industria alimentaria ubicada en el distrito de Ate en la ciudad de Lima. Por su lado, Alatriza *et al.*, (2015) utilizaron almidón de *T. aestivum* L. como floculante para tratar un efluente de una industria textil ubicada en la ciudad de Arequipa, Perú. Ambos efluentes industriales presentan color residual. En primera instancia debido al color caramelo, propio de la salsa de soya "siyau", en segunda instancia principalmente por azocolorantes recalcitrantes. En el caso del almidón de *S. tuberosum* al reaccionar con una dosis de 255 mg·L<sup>-1</sup> de sulfato de aluminio se logró una remoción de color (absorbancia a 560nm) de 93,89%. Por su lado, con una dosis de 75 mg·L<sup>-1</sup> de sulfato de aluminio con el almidón de *T. aestivum* no se lograron valores favorables en la remoción de color (absorbancia a 565nm). A diferencia del almidón gelatinizado de *S. tuberosum* que se preparó únicamente con agua destilada en ebullición, el almidón de *T. aestivum* pasó por un proceso de hidrolización por Na(OH), que llevó a que la solución madre de almidón llegue a pH alcalino, además todos los ensayos de la prueba de jarras en el trabajo de Alatriza *et al.* (2015) se realizaron a pH 10. Así, teniendo en cuenta que el rango de pH en que mejor actúa el sulfato de aluminio es 6,5 - 8, se pueden explicar los valores no favorables de sus ensayos con respecto al color con tan baja dosis de sulfato de aluminio, similar fue el caso para el DQO que no mostró un incremento mayor al 25% para los porcentajes de remoción de DQO ni DBO<sub>5</sub>. Reafirmando así la importancia del pH en el ensayo de la prueba de jarras.

Por el contrario, en México, Solís *et al.* (2012), evaluaron las aguas superficiales con mezclas de sulfato de aluminio y almidón de *Manihot esculenta* Crantz "yuca" para así disminuir la cantidad de sulfato de aluminio usado en el tratamiento convencional. En este caso mediante el ensayo de la prueba de jarras se determinó que la dosis óptima del sulfato de aluminio fue 30 mg·L<sup>-1</sup>, en la clarificación de una muestra de agua de río (color de 85

CU, turbiedad de 70 NTU y pH de 6,8). Esta dosis, les sirvió como base para la preparación de seis mezclas con distintas composiciones de almidón y sulfato de aluminio. Donde los resultados indicaron que la mayor reducción de color fue de 94% y la remoción de turbidez fue de 98,7%, los cuales se obtuvieron con 2 mg·L<sup>-1</sup> de yuca más sulfato de aluminio. Finalmente, en su trabajo, el pH no varió significativamente para todos los tratamientos. Por su parte, en este trabajo de investigación con almidón de *S. tuberosum* no se realizaron mezclas debido a que al hacer uso del sulfato de aluminio y del policloruro de aluminio solos sin un floculante no se evidenciaron mejoras visuales ni formación de flocs. Por otro lado, en este trabajo no se ha medido el aluminio residual después de los tratamientos aquí descritos, teniendo en cuenta que el VMA para aluminio en efluentes industriales es 10 mg·L<sup>-1</sup>, queda como un vacío a ser llenado antes de querer implementar cualquiera de los tratamientos primarios expuestos en esta investigación para asegurar que se cumplan todos los VMA necesarios.

Finalmente, los resultados expuestos demuestran que el almidón gelatinizado de *S. tuberosum* puede reemplazar a la poliacrilamida aniónica como floculante, a nivel laboratorio realizando pruebas de jarras, con agua residual industrial proveniente de la industria alimentaria. El almidón de papa fue escogido por ser un insumo utilizado en la empresa patrocinadora en la preparación de sus productos, pero también se ha documentado que se puede utilizar el almidón de plátano (Trujillo *et al.*, 2014) y el almidón de yuca (Solís *et al.* 2012) para remover turbidez y reducir la carga orgánica de aguas residuales. Al utilizar una mezcla de sulfato de aluminio/almidón de yuca (1:0.07), empleando así mucho menor cantidad de almidón que en los estudios realizados por Laines *et al.* (2008) en los que se utilizaron una mezcla de sulfato de aluminio/almidón de plátano en proporción (1:1), lo cual no sólo implica un ahorro económico asociado a la producción y dosificación de almidón en una unidad de coagulación-floculación de escala industrial, sino que también permite disminuir el efecto del uso del agente floculante en el incremento del carbono orgánico total (COT) y de la Demanda Química de Oxígeno (DQO) en el agua tratada, cuyos parámetros son criterios establecidos de la calidad del agua en las plantas potabilizadoras. Sin embargo, debe tenerse en mente que en los estudios de Laines *et al.* (2008) el agua tratada provino de un relleno sanitario mientras que en el estudio de Solís *et al.* (2012) el agua tratada es agua superficial de un río por lo cual se infiere que las mezclas podrían actuar de manera diferente.

Los parámetros óptimos en el ensayo de la prueba de jarras utilizando como coagulante sulfato de aluminio

y como floculante poliacrilamida aniónica, fueron los siguientes: En la coagulación, sulfato de aluminio al 1,5% con la dosis 255 mg·L<sup>-1</sup> a velocidad de 210 rpm por 1 min y en la floculación, poliacrilamida aniónica al 0,1%, con una dosis de 5 mg·L<sup>-1</sup> a velocidad de 75 rpm por 20 min y finalmente con un tiempo de sedimentación de 15 min, alcanzándose un porcentaje de reducción de DQO de 66,38%, es decir, la muestra inicial de efluente industrial no doméstico de la industria alimentaria tuvo 1743 mg·L<sup>-1</sup> de DQO, mientras que la muestra después del tratamiento mencionado tuvo 586 mg·L<sup>-1</sup> de DQO, cumpliendo así su VMA para su descarga en el alcantarillado.

Los parámetros óptimos en el ensayo de la prueba de jarras utilizando como coagulante policloruro de aluminio y como floculante poliacrilamida aniónica, se describen a continuación: En la coagulación, policloruro de aluminio al 20% con la dosis 100 mg·L<sup>-1</sup> a velocidad de 210 rpm por 1 min y en la floculación, poliacrilamida aniónica al 0,1%, con una dosis de 5 mg·L<sup>-1</sup> a velocidad de 75 rpm por 20 min y finalmente con un tiempo de sedimentación de 15 min, alcanzándose un porcentaje de reducción de DQO de 83,05%, es decir, la muestra inicial de efluente industrial no doméstico de la industria alimentaria tuvo 1794 mg·L<sup>-1</sup> de DQO, mientras que la muestra después del tratamiento mencionado tuvo 304 mg·L<sup>-1</sup> de DQO, cumpliendo así su VMA para su descarga en el alcantarillado.

Los parámetros óptimos en el ensayo de la prueba de jarras utilizando como coagulante sulfato de aluminio y como floculante almidón gelatinizado, fueron los siguientes: en la coagulación, sulfato de aluminio al 1,5% con la dosis 255 mg·L<sup>-1</sup> a velocidad de 210 rpm por 1 min y en la floculación, almidón gelatinizado al 0,3%, con una dosis de 450 mg·L<sup>-1</sup> a velocidad de 40 rpm por 20 min y finalmente con un tiempo de sedimentación de 15 min, alcanzándose un porcentaje de reducción de DQO de 65,60%, es decir, la muestra inicial de efluente industrial no doméstico de la industria alimentaria tuvo 1814 mg·L<sup>-1</sup> de DQO, mientras que la muestra después del tratamiento mencionado tuvo 624 mg·L<sup>-1</sup> de DQO, cumpliendo así su VMA para su descarga en el alcantarillado.

Los parámetros óptimos en el ensayo de la prueba de jarras utilizando como coagulante policloruro de aluminio y como floculante poliacrilamida aniónica, se detallan a continuación: en la coagulación, policloruro de aluminio al 20% con la dosis 100 mg·L<sup>-1</sup> a velocidad de 210 rpm por 1 min y en la floculación, almidón gelatinizado al 0,3%, con una dosis de 270 mg·L<sup>-1</sup> a velocidad de 75 rpm

por 20 min y finalmente con un tiempo de sedimentación de 15 min, alcanzándose un porcentaje de reducción de DQO de 65,69%, es decir, la muestra inicial de efluente industrial no doméstico de la industria alimentaria tuvo 1766 mg·L<sup>-1</sup> de DQO, mientras que la muestra después del tratamiento mencionado tuvo 606 mg·L<sup>-1</sup> de DQO, cumpliendo así su VMA para su descarga en el alcantarillado.

Después de realizar los barridos espectrales de 10 muestras iniciales de efluente industrial, no doméstico de la industria alimentaria se determinó que la longitud de onda 350nm era la más adecuada para calcular la absorbancia. Es así como, al relacionar la absorbancia a 350nm con la turbidez (NTU), se obtuvo una relación lineal con un coeficiente de determinación "R<sup>2</sup>" de 0,94, lo que indicó que hay una relación lineal muy alta entre la variable absorbancia y la variable turbidez, y que en el laboratorio de Investigación y Desarrollo de la empresa patrocinadora se puede estimar el valor de la turbidez a partir de la absorbancia a 350nm con la siguiente ecuación:  $Turbidez = [(1060 * Absorbancia_{350nm}) - 23,216]$ . Ya que en el laboratorio no se contaba con nefelómetro, pero sí con espectrofotómetro.

Al relacionar la turbidez (NTU) con la DQO (mg·L<sup>-1</sup>), también se obtuvo una relación lineal, con un coeficiente de determinación "R<sup>2</sup>" de 0,99, lo que indicó que hay una regresión lineal muy alta entre la variable turbidez y la variable DQO, y una vez se haya estimado la turbidez con la fórmula anteriormente mencionada, también se puede estimar la carga orgánica presente en el efluente industrial no doméstico de la industria alimentaria con la fórmula:  $DQO = [(2,7753 * Turbidez) + 202,41]$ . Así se podría monitorear la calidad de efluente que se estaba descargando al alcantarillado y verificar si cumplía el VMA en el aspecto de la carga orgánica.

Se demostró que se puede reemplazar la poliacrilamida aniónica por almidón de *S. tuberosum* al aplicar un tratamiento primario a un efluente industrial no doméstico de una empresa alimentaria ubicada en el distrito de Ate en la ciudad de Lima, para cumplir los VMA del Decreto Supremo N°021-009-Vivienda, en el aspecto de la carga orgánica presente.

Así, la contribución de este trabajo es que no realizaron mezclas de almidón de papa con ningún coagulante, si no que se probó como un floculante independiente al reaccionar con sulfato de aluminio o policloruro de aluminio como coagulantes, resaltando que el agua residual industrial tratada no excedió los 2500 mg·L<sup>-1</sup> de DQO en ninguna muestra puntual recolectada.

En este trabajo por falta de antecedentes en este tipo de agua residual se siguieron las indicaciones de la norma "ASTDM D2035-13" al pie de la letra es decir: el tiempo de coagulación fue 1 min, el tiempo de floculación fue 20 min y el tiempo de sedimentación fue 15 min, pero cabe resaltar que visualmente los flocs para el caso de los ensayos finales 1, 2, 3 y 4 sedimentaron rápidamente, tanto así que se recomienda hacer pruebas posteriores con menos tiempo de sedimentación para evitar que los mismos flocs se desintegren por exceso de movimiento. Antes de implementar un tratamiento primario como coagulación-floculación se debería hacer un estudio de cómo la salinidad presente en el efluente industrial dañaría la maquinaria y cómo esta sal actúa como inhibidor del proceso de coagulación.

## REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Aguilar, M.; Saez, J.; Llórens, M.; Soler, A.; Ortuño, J.F.; Messeguer, V. & Fuentes, A. 2005. Improvement of coagulation-flocculation process using anionic polyacrylamide as coagulant aid. *Chemosphere*, 58:47-56.
- Alatriza, G.; Quiroz, A. & Butrón, M. 2015. Tratamiento de efluentes textiles por coagulación-floculación utilizando almidón de *Triticum aestivum* L. como ayudante del proceso. *The Biologist* (Lima), 13: 297-312
- Alcarráz, M., Gamarra, G.; Castro, A. & Godoy, J. 2010. Eficacia de coagulantes en el tratamiento primario de efluentes de procesadora de frutas. *Ciencia e Investigación*, 13: 60-66.
- American Public Health Association (APHA). 2012. *Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater* (22<sup>va</sup>. ed.) New York, Estados Unidos.
- Anastasakis, K.; Kalderis, D. & Diamadopoulou, E. 2010. Flocculation behavior of mallow and okra mucilage in treating wastewater. *Water Science and Technology: Water Supply*, 61: 786-791.
- Antov, M.; Šćiban, M. & Petrović, N. 2010. Proteins from common bean (*Phaseolus vulgaris*) seed as a natural coagulant for potential application in water turbidity removal. *Bioresource Technology*, 101: 2167-2172.
- Area, M.; Ojeda, S.; Barboza, O.; Bengoechea, D. & Felissia, F. 2010. Tratamientos aplicables para la reducción de la DQO recalcitrante de efluentes de pulpados quimimécánicos y semiquímicos (revisión). *Revista de Ciencia y Tecnología*, 13: 4-12.
- Autoridad Nacional del Agua (ANA). 2012. *Estrategia para el mejoramiento de la calidad de los recursos hídricos en el Perú*. Lima, Perú. 25 pp.
- Beltrán, J.; Sánchez, J.; Delgado, A. & Jurado, C. 2009. Removal of alizarin violet 3R (anthraquinonic dye) from aqueous solutions by natural coagulants. *Journal of Hazardous Materials*, 170: 43-50.
- Bourke, M. 2000. *Full scale study of chemically enhanced primary treatment in Riviera de Sao Lourenco, Brazil*. (Master's thesis) Massachusetts Institute of Technology, Department of Civil and Environmental Engineering, Cambridge, USA. 148pp.
- Cabrera, X.; Fleites, M. & Contreras, A. 2009. Estudio del proceso de coagulación-floculación de aguas residuales de la empresa textil "Desembarco del Granma" a escala de laboratorio. *Tecnología Química*, 29: 64-73.
- Castrillón, D. & De Los Ángeles, M. 2012. *Determinación de las dosis óptimas del coagulante sulfato de aluminio granulado tipo B en función de la turbiedad y el color para la potabilización del agua en la planta de tratamiento de Villa Santana* (Tesis de Pregrado). Facultad de Tecnologías. Universidad Tecnológica de Pereira. Pereira, Colombia. 85pp.
- Company, J. 2000. *Coagulantes y floculantes aplicados en el tratamiento de aguas*. Gestió i Promoció Ed. Barcelona. 255 pp.
- Cogollo, J. 2011. Clarificación de aguas usando coagulantes polimerizados: caso del hidroxiclورو de aluminio. *Dyna*, 78: 18-27.
- Dogu, I. & Arol, A. 2004. Separation of dark-colored minerals from feldspar by selective flocculation using starch. *Powder Technology*, 139: 258-263.
- Food and Agriculture Organization (FAO). 2011. *Compendium of Food Additive Specifications*. Joint FAO/WHO Expert Committee on Food Additives. 74th Meeting 2011. Food and Agriculture Organization of the United Nations. Rome, Italy.

- Flores, E.; García, F.; Flores-Huicochea, E.; Núñez, M.; González, R. & Bello, L. 2004. Rendimiento del proceso de extracción de almidón a partir de frutos de plátano (*Musa paradisiaca*). Estudio en planta piloto. Acta Científica Venezolana, 55: 86-90.
- Ghaly, A.; Snow, A. & Faber, B. 2006. Treatment of grease filter washwater by chemical coagulation. Canadian Biosystems Engineering/Le génie des biosystèmes au Canada, 48: 6.13 - 6.22.
- Godé, L. 1983. Los polímeros orgánicos floculantes. Tipos, estructuras, propiedades y aplicaciones. Tecnología del Agua, 3: 37-46.
- González, J. 1983. Floculación, mecanismo y clasificación de los diferentes tipos de floculantes. Parte I. Ingeniería Química, 15: 23-30.
- Järnström, L.; Lason, L. & Rigdahl, M. 1995. Flocculation in kaolin suspensions induced by modified starches. Cationically modified starch - effects of temperature and ionic strength. Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects, 104: 191-205.
- Laines, J.; Goñi, A. & Howard, R. 2008. Mezclas con potencial coagulante para tratamiento de lixiviados de un relleno sanitario. Interciencia, 33: 22-28.
- Leal, L.; Llorens, M.; Sáez, J.; Aguilar, M.; Torres, J. & Ortuño, J. 1998. Coagulation-flocculation as tertiary treatment of effluents from deep wastewater stabilization ponds. Anales de Química, 94: 121-126.
- Mantilla, D. 2013. *Extracción y modificación de almidón de plátano cuatro filos (Musa abb del subgrupo silver bluggoe) para posible uso en el tratamiento de potabilización de aguas*. Facultad de Ingeniería Universidad de Cartagena. Cartagena, Colombia. 59 pp.
- Programa de las Naciones Unidas para el Medio Ambiente (PNUMA). 2012. *Perspectivas del medio ambiente mundial 2002 GEO-3*. Editorial Mundi-Prensa. Madrid, Barcelona, México. 424 pp.
- Rincón, A.; Trujillo, D.; Duque, L.; Arcila, J.; Pacheco, S. & Herrera, O. 2014. *Remoción de turbiedad en agua de una fuente natural mediante coagulación/floculación usando almidón de plátano*. Programa de Ingeniería Ambiental. Universidad Católica de Manizales. Manizales, Colombia, 27: 17-34.
- Salas, G. 2003. Tratamiento físico-químico de aguas residuales de la industria textil. Revista Peruana de Química e Ingeniería Química, 5: 73-80.
- Sánchez, F. 2007. *Tratamientos combinados físico-químicos y de oxidación para la depuración de aguas residuales de la industria corchera* (Tesis doctoral) Facultad de Ciencias. Universidad De Extremadura. Badajoz, España. 677pp.
- Solís, R.; Laines, J. & Hernández, J. 2012. Mezclas con potencial coagulante para clarificar aguas superficiales. Revista Internacional de Contaminación Ambiental, 28: 229-236.
- Trujillo, D.; Duque, L.; Arcila, J.; Rincón, A.; Pacheco, S. & Herrera, O. 2014. Remoción de turbiedad en agua de una fuente natural mediante coagulación/floculación usando almidón de plátano. Revista ión, 27: 17-34
- Unda, F. 1976. *Métodos modernos de tratamiento de agua aplicable en América Latina: coagulación, dosificación, mezcla, floculación*. Universidad Católica de Santiago de Chile. Santiago de Chile, Chile. 55 pp.
- Valencia, J. 2000. *Teoría y práctica de la purificación del agua*. Tomo I, Colombia. 43-47 pp.
- Valores Máximos Admisibles (VMA). 2009. *Descargas de aguas residuales No Domésticas*. Decreto Supremo N°021-2009-Vivienda. Ministerio de Vivienda, Construcción y Saneamiento, (19 de Noviembre de 2009).
- Vásquez, O. 1994 *Extracción de coagulantes naturales del nopal y aplicación en la clarificación de aguas superficiales* (Tesis de Maestría). Universidad Autónoma de Nuevo León. Monterrey, México. 103 pp.

Received 12 february, 2018.

Accepted 25 june, 2018.