

## Comparación de floculantes en el tratamiento de agua residual doméstica Comparison of flocculants in the treatment of domestic wastewater

E.G. Carrillo-Cedillo \*, E. Zavala-Flores 

Facultad de Ciencias Química e Ingeniería, Universidad Autónoma de Baja California, Tijuana B.C., 22427, México.

### Resumen

Se evaluó el desempeño de floculantes aniónicos y catiónicos; en presencia de coagulantes, con el fin de utilizarlos en el tratamiento de agua residual. Se utilizó el floculante aniónico AN934 y a la par se deja fija la concentración de  $\text{FeCl}_3$  el cual actúa como coagulante, asimismo se estudió el uso de floculante catiónico con nombre comercial Fluxol C650 que pertenece a la familia de las poliácridamidas, dichos tratamientos se aplicaron a muestras de agua residual doméstica de la ciudad de Tijuana provenientes de la alcantarilla municipal, se midieron los parámetros como son: turbiedad, pH, color y sólidos suspendidos, con la finalidad de reducirlos mediante la metodología de la prueba de jarras. Ambos floculantes funcionan en un amplio intervalo de pH, reduce el uso de sales inorgánicas, presentan alta solubilidad en agua y muy buena velocidad de sedimentación. Los flóculos formados con el AN934 son gruesos a diferencia de los flóculos formados utilizando Fluxol C650.

**Palabras Clave:** floculante aniónico y catiónico, agua residual doméstica, formación de flóculos, sedimentación, clarificación de agua.

### Abstract

The performance of anionic and cationic flocculants was evaluated in the presence of coagulants, to use them in wastewater treatment. The anionic flocculant AN934 was used and at the same time the concentration of  $\text{FeCl}_3$ , which acts as a coagulant, was fixed. The use of a cationic flocculant with the commercial name Fluxol C650, which belongs to the polyacrylamide family, was also studied: turbidity, pH, color, and suspended solids were measured to reduce them using the jar test methodology. Both flocculants work in a wide pH range, reduce the use of inorganic salts, have high water solubility and very good sedimentation velocity. The flocs formed with AN934 are coarse as opposed to the flocs formed using Fluxol C650.

**Keywords:** anionic and cationic flocculant, domestic wastewater, floc formation, sedimentation, water clarification.

## 1. Introducción

La problemática hídrica que enfrenta la península de Baja California se ubica en una de las zonas del país con menor precipitación media anual, actualmente existe una brecha o déficit de agua de  $450 \text{ hm}^3$  y para el año 2030, se estima que este alcance los  $543 \text{ hm}^3$  (CONAGUA, 2008). Por tal motivo se requiere estudiar los procesos de tratamiento en el agua residual doméstica, con el fin de poder darle reúso.

Uno de los primeros esfuerzos por brindar una fuente de abastecimiento para uso doméstico a la ciudad de Tijuana, fue la construcción de la Presa Abelardo L. Rodríguez. En esta zona del país la cantidad de lluvia es escasa y se vio que el abastecimiento de agua era insuficiente. A partir de los años 60 se inició con el Proyecto del Acueducto Río-Colorado-Tijuana y se terminó en 1975, para 1992 se requería de  $4 \text{ m}^3/\text{s}$ , agua que es transportada desde el Río Colorado. Verdaderamente

transportar agua a la ciudad es una labor titánica se ocupa cruzar por la sierra de la Rumorosa lo que ocasiona un gasto energético muy alto (CESPT, 2022)

### 1.1. Coagulantes y Floculantes

La coagulación se refiere al proceso de desestabilización de la materia coloidal en suspensión. Estas partículas en suspensión mantienen de forma natural un equilibrio de cargas positivas y negativas que las mantienen separadas de forma estable. Al romper este equilibrio, estos coloides pueden coagularse (Derypol, 2021).

La floculación se refiere a los procesos dinámicos que tienen lugar en el medio acuoso, donde las partículas coaguladas entran en contacto formando flóculos. Esta floculación se produce mediante la formación de enlaces

\*Autor para la correspondencia: gaby@uabc.edu.mx

Correo electrónico: gaby@uabc.edu.mx (Eugenia Gabriela Carrillo-Cedillo), zavala.ethiel@uabc.edu.mx (Ethiel Zavala-Flores).

químicos entre dos o más partículas. Los flóculos así formados son estructuras tridimensionales blandas y porosas que tienen un peso específico que difiere ligeramente del agua, lo que permite separarlos por medios físicos como decantación, flotación o filtración (Derypol, 2021).

### 1.2. Clasificación de coagulantes

Los coagulantes pueden ser inorgánicos o sintéticos. Para el caso de los inorgánicos los cationes altamente cargados son los más eficaces para modificar la carga de las partículas, por lo que se suelen utilizar sales de  $Al^{+3}$  y  $Fe^{+3}$ , y a menudo se necesita cal o sosa cáustica para contrarrestar cualquier descenso del pH. La sal de aluminio más utilizada es el sulfato comúnmente llamado "alumbre", que describe el  $Al_2(SO_4)_3 \cdot 14H_2O$  o el  $Al_2(SO_4)_3 \cdot 18H_2O$ . También existen sales de aluminio poliméricas parcialmente hidrolizadas, sobre todo el policloruro de aluminio (PAC). Aunque son más caras, proporcionan una formación de agregados más rápido, dosis más bajas, no reducen el pH y tienen un mejor rendimiento a bajas temperaturas (Fawell, Adkins, & Costine, 2015).

Las sales de ion férrico que se utilizan son como sulfato o cloruro ( $Fe_2(SO_4)_3 \cdot 7H_2O$  o  $FeCl_3 \cdot 6H_2O$ , respectivamente) y ambos se comportan de forma similar al alumbre. Pueden ser preferidos al alumbre por su mayor rango de pH, su mejor aplicabilidad en agua con alta dureza y cuando hay preocupaciones sanitarias por los niveles de aluminio en la disolución.

Los coagulantes sintéticos como los polímeros catiónicos son líquidos capaces de modificar la carga superficial sin necesidad de que se formen precipitados, y no afectan de forma apreciable al pH. Por lo tanto, ofrecen ventajas considerables con respecto a las sales inorgánicas, como la aplicabilidad en un rango de pH más amplio, dosis muy reducidas, volúmenes de lodos muy reducidos y pocos problemas de incrustación, corrosión y manipulación (Fawell, Adkins, & Costine, 2015).

### 1.3. Clasificación de floculantes

Los floculantes orgánicos se dividen en dos categorías: naturales y sintéticos. Los polímeros naturales utilizados son los polisacáridos, principalmente los almidones, el dextrano, el glucógeno, los diferentes tipos de gomas, los alginatos y los derivados de la celulosa. Los floculantes sintéticos se dividen en: aniónicos, catiónicos (ver Figura 1) y no iónicos (Brostow, Hagg Lobland, Pal, & Singh, 2009).

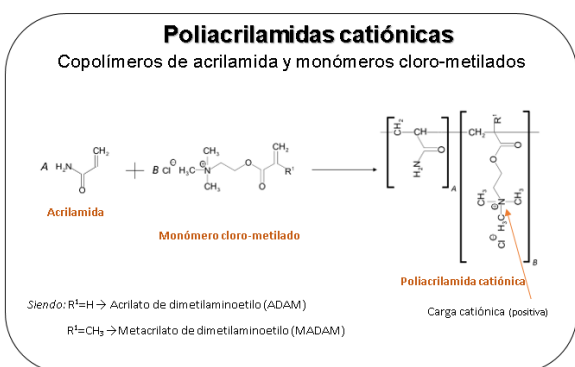


Figura 1: Poliacrilamidas catiónicas (Biotex, 2015).

### 1.4. Mecanismo de floculación.

En general, el desarrollo de la formación de flóculos implica varios pasos que ocurren secuencialmente:

- (a) Dispersión del floculante en la disolución.
- (b) Difusión del floculante hacia la interfase sólido-líquido.
- (c) Adsorción del floculante en la superficie de las partículas.
- (d) Colisión de las partículas que llevan un floculante adsorbido con otras partículas.
- (e) Adsorción del floculante sobre otras partículas para formar microfloculos.
- (f) Crecimiento de los microfloculos hasta convertirse en flóculos más grandes y fuertes por colisión y adsorción sucesivas (Lee, Robinson, & Chong, 2014).

### 1.5. Tipo de polímero

Los floculantes más utilizados suelen ser copolímeros de acrilamida y acrilato de sodio, ver Figura 2. Este copolímero y sus muchas variaciones pueden comportarse de forma muy diferente en distintos sistemas. La fuerza motriz de la adsorción está controlada por las propiedades mineralógicas de los sólidos en suspensión, además del medio acuoso. Los principales grupos moleculares de este tipo de polímeros son la amida y el carboxilato. Se sabe que ambos grupos se adsorben en la superficie mineral; sin embargo, hay varios estudios que sugieren que estos grupos funcionales tienen distintas funciones primarias. La función principal del grupo amida en los copolímeros es la adsorción por enlace de hidrógeno. La función principal del grupo carboxilato es extender la cadena del polímero en solución mediante repulsión electrostática, lo que permite la formación de puentes (Pillai, 1997).

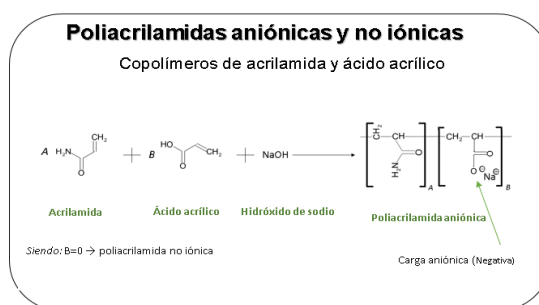


Figura 2: Poliacrilamidas aniónicas y no iónicas (Biotex, 2015).

## 2. Materiales y métodos

**Materiales y equipo:** Equipo para prueba de jarras marca Phipps & Bird modelo PB700 acondicionado con 6 paletas, potenciómetro VWR provisto con electrodo de vidrio para pH, medidor de turbidez modelo 2100P Hach con celdas de vidrio redondas de 10 mL, espectrofotómetro DR5000 Hach con celdas de vidrio redondas de 25 mL, micropipetas eppendorf de volumen variable de 100 a 1000  $\mu$ L. Vasos de precipitado de 600 mL, probetas de vidrio de 500 mL.

**Equipo para toma de muestra:** Cucharón de mango largo de polietileno de alta densidad con extensión.

**Muestras:** Agua residual doméstica de la alcantarilla de la Ciudad de Tijuana colectada el día de los experimentos.

**Reactivos:**  $FeCl_3 \cdot 6H_2O$ , estándar de formacina, estándar de Pt-Co. Floculante AN934, Floculante Fluxol 650.

**Software:** Statgraphics Centurion XVI.I

### 2.1. Metodología para floculante AN934

Se utilizó un diseño factorial  $2^2$  aleatorizado, con dos puntos centrales y cuatro variables de respuesta (pH, sólidos suspendidos, color y turbiedad): en estudios anteriores se estableció que la cantidad de coagulante utilizado es del 5% de  $FeCl_3$ , mismo que se dejó fijo para estos experimentos. En la Tabla 1 se muestran las variables estudiadas a muestra de agua residual doméstica de la ciudad de Tijuana, utilizando un floculante aniónico del tipo AN934:

Tabla 1: Floculante AN934.

Factores	Bajo	Alto	Unidades
AN934	1	5	%
Tiempo de sedimentación	10	20	min

### 2.2. Metodología para floculante Fluxol C650

Se utilizó un diseño factorial  $2^2$  aleatorizado, con dos puntos centrales y cuatro variables de respuesta (pH, sólidos suspendidos, color y turbiedad): en estudios anteriores se estableció que la cantidad de coagulante utilizado es del 5% de  $FeCl_3$ , mismo que se dejó fijo para estos experimentos. En la Tabla 2 se muestran las variables estudiadas a muestra de agua residual doméstica de la ciudad de Tijuana, utilizando un floculante catiónico como el fluxol C650:

Tabla 2: Floculante Fluxol C650.

Factores	Bajo	Alto	Unidades
Fluxol C650	0.1	0.5	%
Tiempo de sedimentación	10	20	min

## 3. Discusión y resultados

En la Figura 3 se muestran los diferentes tratamientos realizados a 300 mL de agua residual doméstica, de acuerdo con las especificaciones de la Tabla 1.

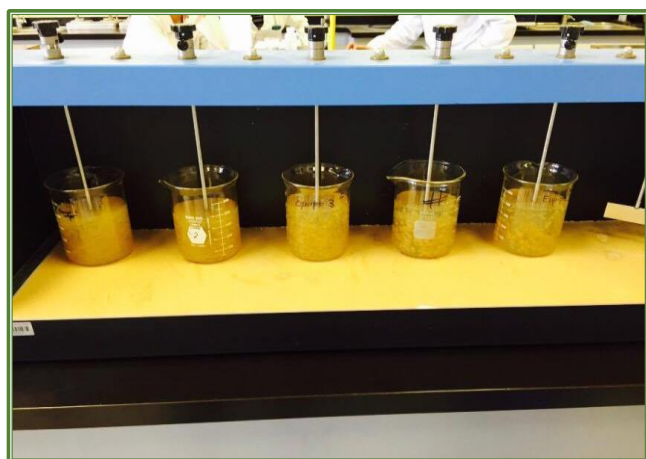


Figura 3: Experimentos con floculante AN934.

En la Figura 4 se muestran los diferentes tratamientos realizados a 300 mL de agua residual doméstica, de acuerdo con las especificaciones de la Tabla 2.

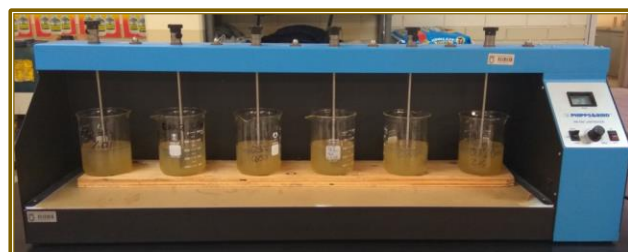


Figura 4: Experimentos con floculante Fluxol C650.

En la Figura 5 se muestra el diagrama de Pareto para Turbidez, el efecto significativo para la interacción entre el floculante AN934 y el tiempo de sedimentación.

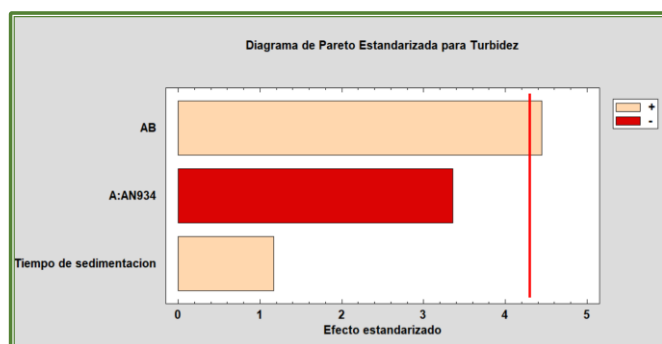


Figura 5: Diagrama de Pareto para turbidez con floculante AN934.

En el gráfico de efectos principales se observa cómo cambia la concentración de sólidos suspendidos al incrementar la concentración de floculante AN934, ver Figura 6.

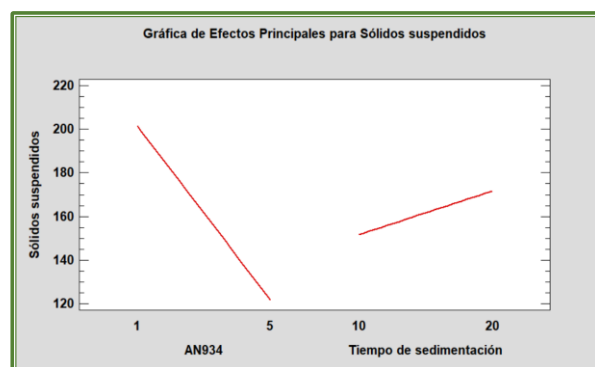


Figura 6: Gráfico de efectos principales para sólidos suspendidos utilizando floculante AN934.

En la Ecuación 1, de regresión múltiple, se representa el modelo ajustado para sólidos suspendidos (SS) cuando se utiliza floculante AN934 y tiempo de sedimentación ( $t_{sed}$ ). El valor del coeficiente de regresión múltiple ( $r^2$ ) es de 0.8868:

$$SS = 124.167 + 2.5 * AN934 + 6.5 * t_{sed} - 1.5 * AN934 * t_{sed} \quad (1)$$

En la Figura 7 se muestran los gráficos para los valores de pH al utilizar los dos floculantes, cuando se utiliza 5% de floculante AN934 el valor promedio de pH es de 6.35, para el caso del floculante fluxol C650 una concentración de 0.5% el valor promedio de pH es de 6.12.

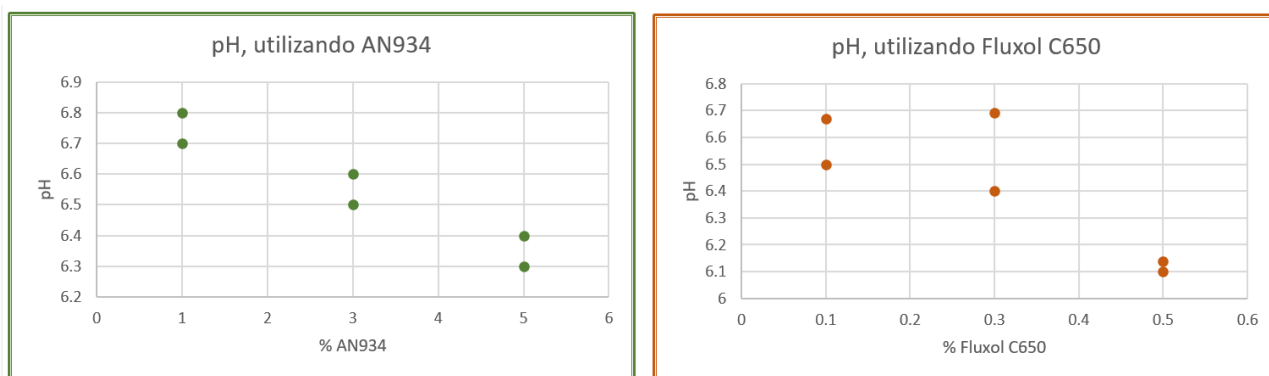


Figura 7: Comparación de pH al utilizar los dos floculantes AN934 y Fluxol C650

En la Figura 8 se muestran los gráficos de contornos para el parámetro de sólidos suspendidos con cada uno de los

floculantes utilizados, observe que con el fluxol C650 la concentración de sólidos suspendidos es más pequeña.

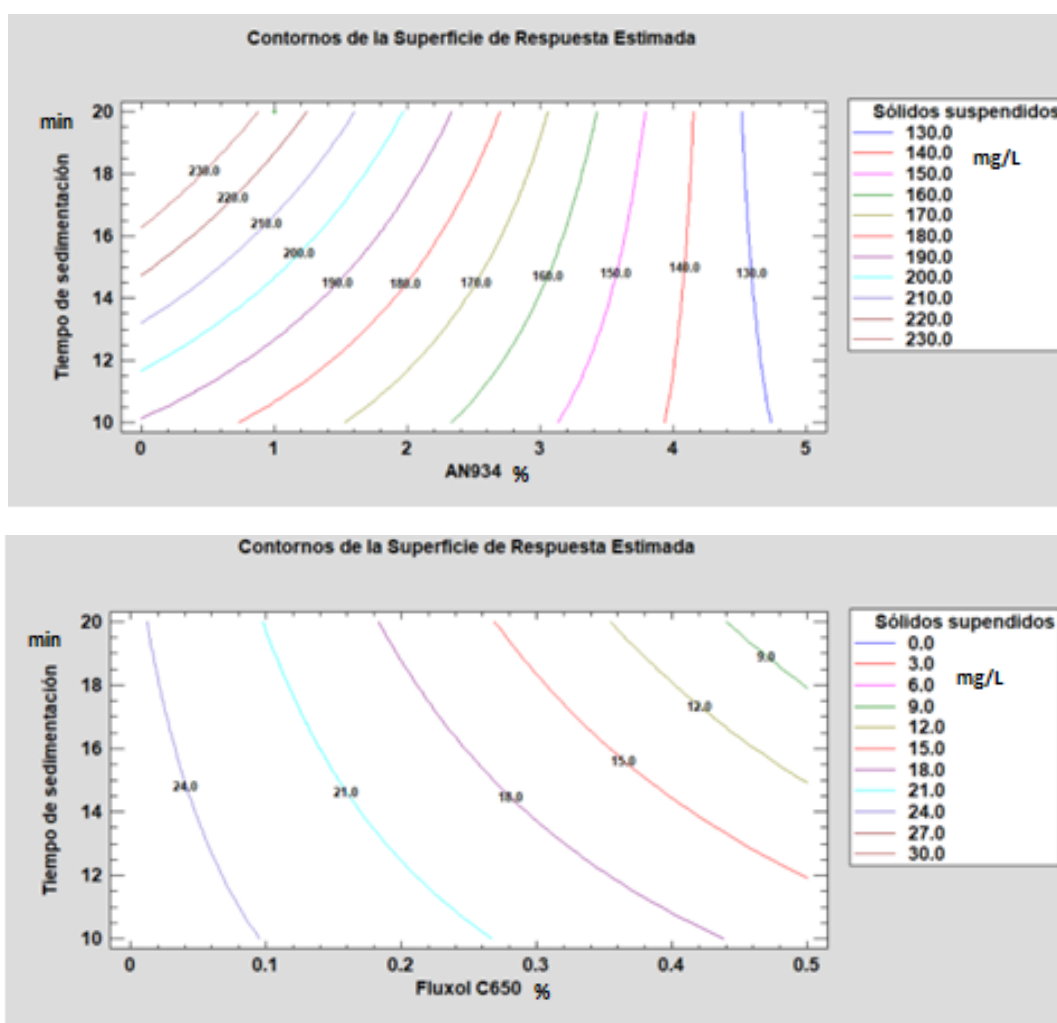


Figura 8: Comparación de sólidos suspendidos al utilizar los dos floculantes AN934 (arriba) y Fluxol C650 (abajo).

En la Figura 9 se muestran la formación de flóculos obtenidos para cada uno de los floculantes utilizados, observe que cuando se usa el floculante AN934 son gruesos, debido a

que contiene un grupo polar que puede absorber partículas sólidas suspendidas en el agua, de modo que el puente entre las partículas forme floculantes grandes.



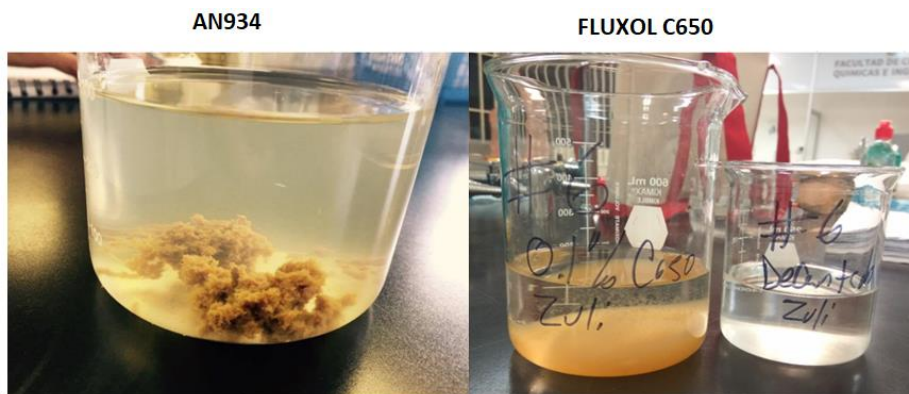


Figura 9: Comparación de formación de flóculos al utilizar los dos floculantes AN934 y Fluxol C650

En la Ecuación 2, de regresión múltiple, se representa el modelo ajustado para sólidos suspendidos (SS) cuando se utiliza floculante Fluxol C650 y tiempo de sedimentación ( $t_{sed}$ ). El valor del coeficiente de regresión múltiple ( $r^2$ ) es de 0.8201:

$$SS = 26.25 + 10 * Fluxol\ C650 - 0.025 * t_{sed} + -2.75 * Fluxol\ C650 * t_{sed} \quad (2)$$

En el gráfico de efectos principales se observa cómo disminuye la concentración de sólidos suspendidos al incrementar la concentración de floculante Fluxol C650, ver Figura 10.

Tabla 3: Color.

Experimento	E1	E2	E3	E4	E5	E6
Fluxol C650, Color (Pt-Co)	109	167	107	40	138	65
AN934, Color (Pt-Co)	193	188	186	194	192	190

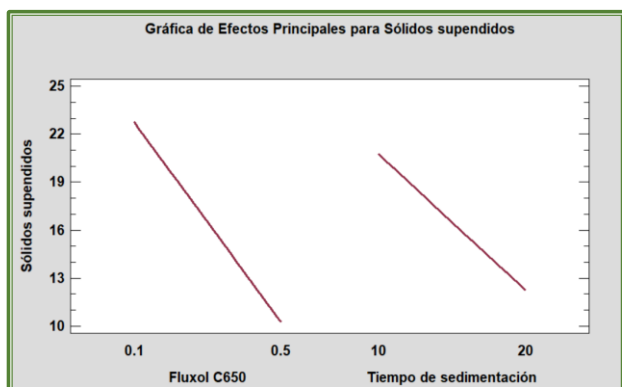


Figura 10: Gráfico de efectos principales para sólidos suspendidos utilizando floculante Fluxol C650.

En la Figura 11 se muestran los resultados del tratamiento utilizando Fluxol C650 después de decantar los experimentos indicados en la Tabla 2.

En la Tabla 3 se anexan los resultados obtenidos para el parámetro de color utilizando Fluxol C650 y AN934.

#### 4. Conclusiones

Para minimizar las variables de respuesta pH, sólidos suspendidos, color y turbiedad, cuando se utiliza floculante AN934 se debe de utilizar una concentración de 5% y un tiempo de sedimentación de 10 min por cada 300 mL de agua

residual doméstica. Para el caso de Fluxol C650 se recomienda utilizar 0.5% y tiempo de sedimentación de 20 minutos. Los flóculos formados con el Fluxol C650 al ser un floculante catiónico, se formaron por una fuerte atracción electrostática. Utilizando el floculante Fluxol C650 se obtuvieron valores más bajos para color y sólidos suspendidos



Figura 11: Resultados después de decantar cuando se utilizó Fluxol C650

#### Agradecimientos

Los autores agradecen a la Universidad Autónoma de Baja California (<https://ror.org/05xwqc167>).

#### Referencias

Biotex. (2015). Coagulation-Flocculation. Biotex Malaysia. Obtenido de <https://www.biotex-malaysia.com/wp-content/uploads/2015/07/Coagulation-Flocculation-E.pdf>

Brostow, W., Hagg Lobland, H., Pal, S., & Singh, R. (2009). Polymeric Flocculants for Wastewater and Industrial Effluent Treatment. *Journal of Materials Education*, 31(3-4), 157-166.

CESPT. (2022). Historia del agua en Tijuana. Tijuana: Gobierno del Estado de Baja California. Retrieved from <https://www.cespt.gob.mx/informa/historiaagua.aspx#:~:text=Actualment e%2C%20la%20poblaci%C3%B3n%20de%20Tijuana,caracter%C3%AD sticas%20necesarias%20para%20su%20potabilizaci%C3%B3n.>

CONAGUA. (2008). Programa Nacional Hídrico 2007-2012. México: Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales. ISBN 978-968-817-836-2

Derypol. (2021). Water Treatment Products. Barcelona, España: Derypol S.A. Retrieved from: [https://www.derypol.com/wp-content/uploads/2021/09/Brochure-Water-Treatment-2021-ENG\\_compressed.pdf](https://www.derypol.com/wp-content/uploads/2021/09/Brochure-Water-Treatment-2021-ENG_compressed.pdf)

Fawell, P., Adkins, S., & Costine, A. (2015). Chapter 6 Reagents. In A. F. R. Jewel (Ed.), *Paste and Thickened Tailings – A Guide* (Third Edition ed.). Australian Centre for Geomechanics.

Lee, C., Robinson, J., & Chong, M. (2014). A review on application of flocculants in wastewater treatment. *Process Safety and Environmental Protection*, 92, 489–508. DOI: 10.1016/j.psep.2014.04.010

Pillai, J. (1997). *Flocculants and Coagulants: The Keys to Water and Waste Management in Aggregate Production*. Nalco Company. Retrieved from [https://anq.org.mx/pqta/pdf/Flocculants%20and%20Coagulants%20NALCO%20\(LIT\).pdf](https://anq.org.mx/pqta/pdf/Flocculants%20and%20Coagulants%20NALCO%20(LIT).pdf)