



Aplicación de un diseño factorial 2^4 en la remoción de turbiedad del Río Rímac mediante la coagulación y floculación usando goma de tara

Application of a Factorial design in the Rímac River Turbidity Removal by Coagulation and Flocculation using Tara Gum

Wilber Perez Huachaca, Javier Linkolk López-Gonzales
E.P. de Ingeniería Ambiental. Universidad Peruana Unión

Resumen

Los coagulantes y floculantes se usan en el tratamiento de aguas para eliminar partículas en suspensión. Las plantas de tratamiento utilizan como coagulantes primarios el sulfato de aluminio o sales de hierro, estos pueden ser reemplazados por coagulantes naturales. El objetivo de esta investigación es determinar la eficiencia de remoción de la turbiedad del río Rímac, mediante la coagulación y floculación con goma de tara (*Caesalpinia Spinosa*). Para ello se utilizó un diseño Factorial de 2^4 que equivale a 16 experimentos, analizando cuatro factores: pH, dosis de coagulante, velocidad de mezcla rápida y velocidad de mezcla lenta, y una variable dependiente que es la turbiedad, la metodología empleada para determinar los valores óptimos es la prueba de jarras. Se pudo concluir que los variables significativos para la remoción de turbiedad son la dosis del coagulante, pH, mezcla rápida y lenta en las siguientes concentraciones, 2% de $(Al_2SO_4)_3$, y una dosis óptima de 5 ml; la goma de tara a una concentración de 0.1% y una dosis de 10 ml. La aplicación del diseño factorial fue a un nivel de significancia del 5%.

Palabras clave: Goma de tara; coagulación-floculación; prueba de jarras; diseños Factoriales.

Abstract

Coagulants and flocculants are used in water treatment to remove suspended particles. Treatment plants use as primary coagulants aluminum sulphate or iron salts, these can be replaced by natural coagulants. The objective of this research is to determine the efficiency of removal of the turbidity of the Rímac river, by means of coagulation and flocculation with tara gum (*Caesalpinia Spinosa*). For this purpose a Factorial design of 2^4 was used, which equates to 16 experiments, analyzing four factors: pH, coagulant dose, fast mixing speed and slow mixing speed, and a dependent variable which is turbidity, the methodology used to determine the Optimal values are the pitcher test. It was concluded that the significant variables for turbidity removal are coagulant, pH, fast and slow mixing in the following concentrations, 2% $(Al_2SO_4)_3$, and an optimal dose of 5 ml; the tara gum at a concentration of 0.1% and a dose of 10 ml. The application of the factorial design was at a significance level of 5%.

Key Words: coagulation-flocculation, Factorial designs, pitcher test, Tare rubber.

Introducción

Las aguas residuales contienen sustancias tanto disueltas como en suspensión, ambas pueden ser orgánicas e inorgánicas. Las materias en suspensión pueden tener un tamaño y densidad, tal que, pueden eliminarse del agua por simple sedimentación, pero algunas partículas son de tamaño pequeño y tienen carga eléctrica superficial, que las hace repelerse continuamente, impidiendo su aglomeración y la formación de partícula pesada para sedimentar. (Trujillo et al., 2014)

Según (Andía, 2000) la finalidad del tratamiento físico-químico consiste en la eliminación de partículas finas en suspensión que por sí solas son imposible de sedimentar. Estas partículas coloidales se componen de sílice coloidal, arcilla y/o partículas orgánicas las cuales presentan gran estabilidad en el agua con un tamaño comprendido entre 0,001 y 1 μm . Constituyen una parte importante de la contaminación ya que son la causa principal de la turbidez y color del agua. El proceso de coagulación reduce la carga negativa, contribuyendo a la agregación de partículas para formar microfloculos. La floculación consiste en la agregación de partículas para formar flóculos más grandes, y esto va a depender de la temperatura y el pH del agua. Por otro lado, la sedimentación comprende la precipitación de sólidos, incluyendo las partículas debidos a la contaminación y sólidos generados por los químicos (Aguilar, 2010).

En los estudios de Myslenkov & Miquelle (2015) el objetivo de la coagulación y floculación es transformar las impurezas que se encuentran en suspensión fina, en estado coloidal o en solución, los microorganismos y el plancton, en partículas de mayor tamaño (flóculos) para que puedan ser eliminadas por sedimentación, y/o filtración o, en algunos casos, por flotación. Las partículas coloidales presentes en el agua exhiben los mayores problemas cuando se trata de remover la turbidez y el color. Esto se debe a las propiedades electrocinéticas de los coloides y también a la consecuencia del tamaño tan reducido de las partículas. Las sales metálicas, como el sulfato de aluminio, cloruro férrico y ferroso, son usadas como coagulantes y forman especies activas al ser adicionadas al agua. Estas especies activas desestabilizan a las partículas por neutralización de cargas, donde las especies catiónicas con alta densidad de carga que se forman con la hidrólisis se adsorben a las partículas presentes en el agua (Días, Gonzaga, & Contreras, 2007).

En la investigación de Tapia, Mamani, Rojas, y Yarango (2010) se usó la goma de tara como floculante y tuvo una gran capacidad para acelerar la formación de flóculos, además no generó aroma ni sabor al agua y por su complejidad les impide ser metabolizados. Este biopolímero se obtiene de las semillas de la tara (*Caesalpinia spinosa*) y se ha encontrado muchas aplicaciones en la industria. La utilización de esta goma (polímeros orgánicos) de origen natural presenta una nula toxicidad dado que en algunos casos se utiliza como materia prima en la industria de alimentos por lo que es una alternativa de coagulantes naturales en los procesos de clarificación, o como acompañante del sulfato de aluminio como en el presente trabajo. La goma de tara no es un floculante muy conocido en este país, debido a que el uso es mayormente en la industria alimentaria.

Según Trujillo et al. (2014) el diseño factorial, como estructura de investigación, es la combinación de dos o más diseños simples (o unifactoriales); es decir, el diseño factorial requiere la manipulación simultánea de dos o más variables independientes (llamados factores), en un mismo experimento. En la presente investigación, se utiliza un diseño factorial de 2⁴. Esta metodología permite definir los factores variables que tienen una mayor influencia en la variable de respuesta que permiten entender las interacciones entre las variables, y por ende permiten reducir el número total de experimentos, ahorrando

Figura 1. Test de Jarras (Lovibond)

1.3. Diseño Factorial 2⁴

El número de variables independientes a evaluar y la complejidad del proceso de la coagulación y floculación, es la razón por la cual algunos estudios de tratamiento de aguas utilizan diseños factoriales en sus estudios, los procedimientos convencionales de coagulación y floculación tienen un consumo significativo de tiempo, y un número relativamente alto de experimentos, como se obtuvo en estudios realizados por (Lorenzo & Acosta, 2006)

Según los estudios realizados Ramirez, Luis, y Huaranga (2016) Esta metodología permite definir los factores variables que tienen una mayor influencia en la variable de respuesta que permiten entender las interacciones entre las variables, y por ende permiten reducir el número total de experimentos, ahorrando esfuerzo y tiempo, ahorrando gasto de insumos y componentes químicos.

En los trabajos de Dávila y González (2010). Utilizo la goma de tara, para la remoción de sólidos totales en vinazas provenientes de una destilería de alcohol. Así, el presente trabajo pretende identificar la influencia de cuatro factores variables sobre la remoción de turbiedad, no como una prueba definitiva de determinación de los valores óptimos, sino como un primer estudio que permita una posterior investigación rigurosa de prueba de jarras que forma parte del trabajo futuro. En tal investigación, los ensayos serían en menor número y se consideraría como variables los factores más relevantes, ya que se empezaría de las conclusiones obtenidas en el presente trabajo.

El presente trabajo permite identificar: las interacciones entre los factores variables, con mayor efecto en remoción de turbiedad. Para ello, se utiliza un diseño factorial que permite identificar los valores óptimos de los parámetros a analizar. Las variables se definen de la siguiente forma, Factores variables: pH, dosis de coagulante, velocidad de mezcla rápida y velocidad de mezcla lenta. La dosis de coagulante se refiere al porcentaje en peso de la mezcla de sulfato de aluminio con goma de tara y como variables de respuesta: turbiedad en UNT. Factores constantes: tipo de agua, tipo de coagulante, tiempo de mezcla rápida, tiempo de mezcla lenta, tiempo de sedimentación. En este caso se utilizará agua con una turbiedad constante para todos los experimentos, dado que el tipo de agua no es un factor variable sino un factor constante. La velocidad de mezcla rápida está en el rango 75-300 rpm y la velocidad de mezcla lenta está en el rango 10- 40 rpm. Así definiendo los valores 100rpm y 150rpm como valores máximos y mínimos con respecto a velocidad de mezcla rápida, y los valores 20rpm y 50rpm como valores máximos y mínimos con respecto a velocidad de mezcla lenta.

1.4. Análisis de datos

Para esta investigación se hicieron 4 pruebas de jarra, con distintas concentraciones de coagulante y floculante para poder determinar la dosis y concentración óptima. A continuación, se detalla las contracciones del coagulante y floculante.

2. Resultados y Discusiones.

Los datos obtenidos en los experimentos se codifican con -1 a los valores bajos y +1 a los valores altos como se muestra en la tabla 2.

Tabla 2. Datos de las corridas con menor y mayor remoción de turbiedad.

Factor variable o característica	Valores para corrida con menor remoción de turbiedad	Valores para corrida con mayor remoción de turbiedad
A pH	(-1) 5	(+1)7
B dosis de coagulante	(-1) 2-0.1%	(+1) 5-1%
C velocidad de mezcla rápida	(-1) 40	(+1) 50
D velocidad de mezcla lenta	(-1) 120	(+1) 160

En la tabla 2 se muestran las corridas con menor y mayor remoción de turbiedad donde -1 es concentraciones bajas y 1 concentraciones altas y de igual forma para los demás variables.

2.1. Análisis estadístico.

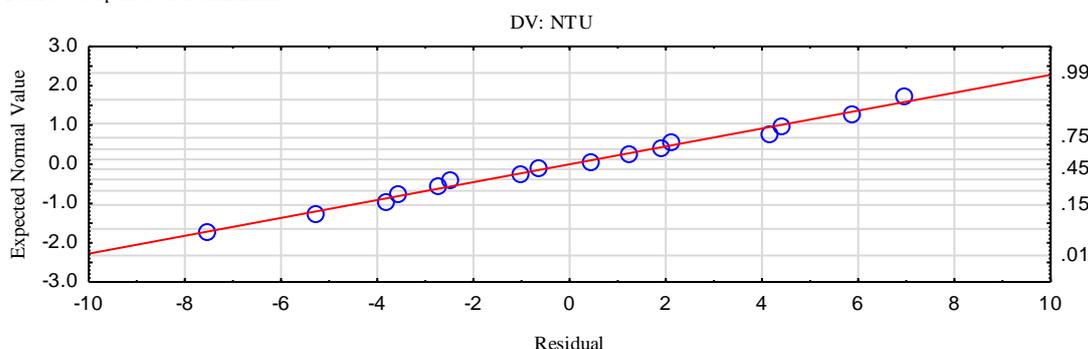
Para los supuestos de normalidad el investigador plantea hipótesis para poder saber si los datos siguen una distribución normal, es decir que los dados analizados son simétricos y no representará problemas en la aplicación del diseño factorial.

2.1.1. Supuesto de Normalidad.

Para poder saber si nuestros datos se ajustan a una distribución normal se hizo un planteamiento de hipótesis:

- H_0 = Los datos siguen una distribución normal.
- H_1 = Los datos no siguen una distribución normal.

Tabla 3. Supuesto de Normalidad



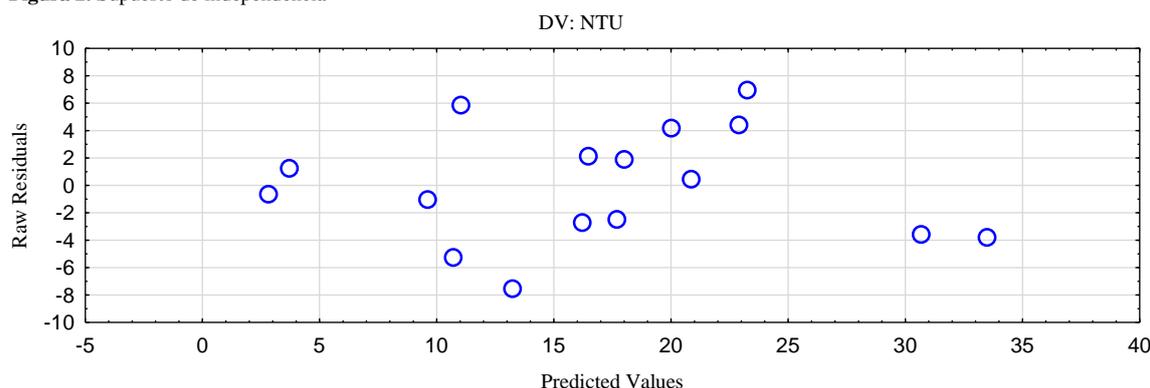
Según Montgomery, (1995) el supuesto de normalidad se puede hacer graficando un histograma de los residuales, esta grafica tiene una característica peculiar, que los datos están próximos a la diagonal, esto significa que, los datos analizados siguen una distribución normal y se acepta H_0 .

2.1.2. Supuesto de Independencia

En el supuesto de independencia se tiene dos hipótesis

- H_0 = los datos son independientes.
- H_1 = los datos no son independientes

Figura 2. Supuesto de independencia



Según la figura 3, se dice que los residuales están sin ninguna estructura en particular y no están relacionados con ninguna otra variable, es decir no sigue ningún patrón definido. Entonces el modelo es correcto y satisface los supuestos, por lo cual se acepta la hipótesis nula (H_0) la cual menciona que los datos son independientes al 95 % de nivel de confianza (Montgomery, 2009).

2.1.3. Análisis de varianza (ANOVA)

Después de realizar la comprobación de los supuestos, se continúa con los análisis de diseño experimental. Se presenta las hipótesis para los bloques y tratamiento; en la tabla 7 los resultados del ANOVA.

- H_0 : Los variables independientes son iguales cero.
- H_1 : Al menos una variable independiente es diferente de cero.

Tabla 3 Análisis de varianza para remoción de turbiedad

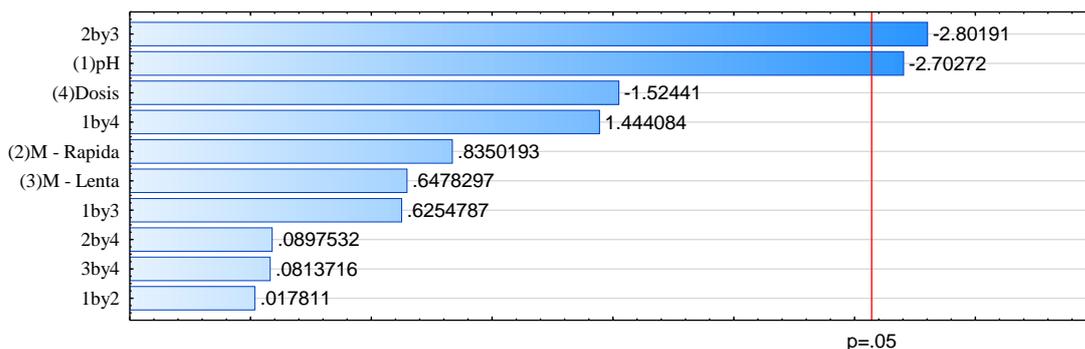
Factor	Fuente	GL	SC _{sec}	F	p
(1)pH	374.33	1.00	374.33	7.30	0.0426
(2)M - Rápida	35.73	1.00	35.73	0.70	0.4418
(3)M - Lenta	21.51	1.00	21.51	0.42	0.5457
(4)Dosis	119.08	1.00	119.08	2.32	0.1879
1 by 2	0.02	1.00	0.02	0.00	0.9865
1 by 3	20.05	1.00	20.05	0.39	0.5591
1 by 4	106.86	1.00	106.86	2.09	0.2083
2 by 3	402.30	1.00	402.30	7.85	0.0379
2 by 4	0.41	1.00	0.41	0.01	0.9320
3 by 4	0.34	1.00	0.34	0.01	0.9383
Error	256.22	5.00	51.24		
Total SS	1336.85	15.00			

De acuerdo a los resultados mostrados en la tabla de ANOVA se va concluir lo siguiente:

- El P valúe en la variable independiente pH es menos el nivel de significancia, por tanto se rechaza la hipótesis nula; es decir la variable es diferente de cero es decir es significativo.
- El P valúe en la variables 2y3 es menor que el nivel de significancia, por tanto se rechaza la hipótesis nula; es decir la variable es diferente de cero es decir es significativo

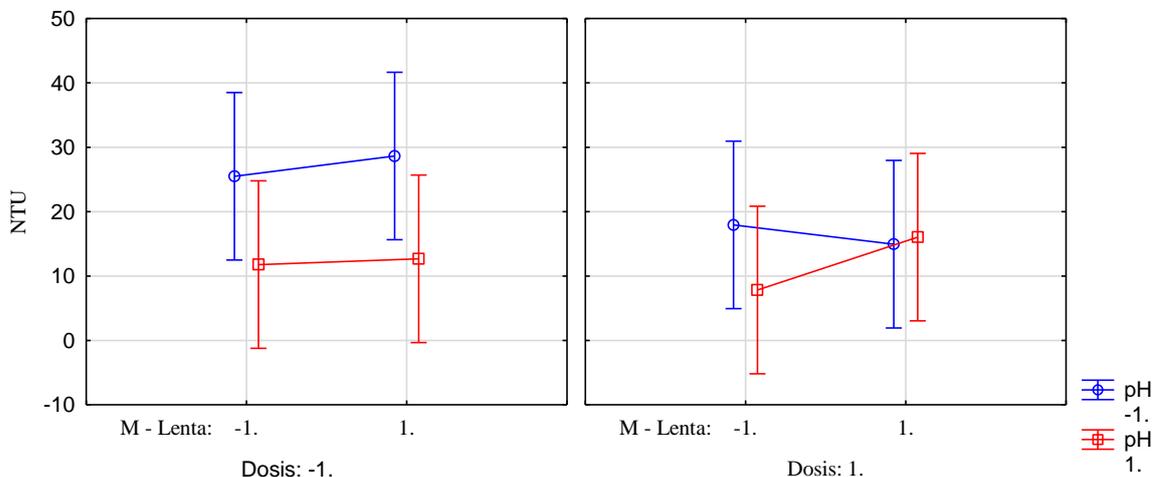
En los estudios de Trujillo et al. (2014) los resultados de ANOVA demostraron que las variables significativas en el análisis fueron el pH y el gradiente de velocidad para mezcla lenta. Además de esto se observa que el gradiente de mezcla lenta se presenta como factor relevante al interactuar con la dosis de coagulante, los gradientes de mezcla rápida y el pH. Esto concuerda con la literatura de Montes Gazabón & Olivero Verbel, (2013) donde los resultados muestran los mismos factores como variables típicas.

Figura 3. Diagrama de Pareto



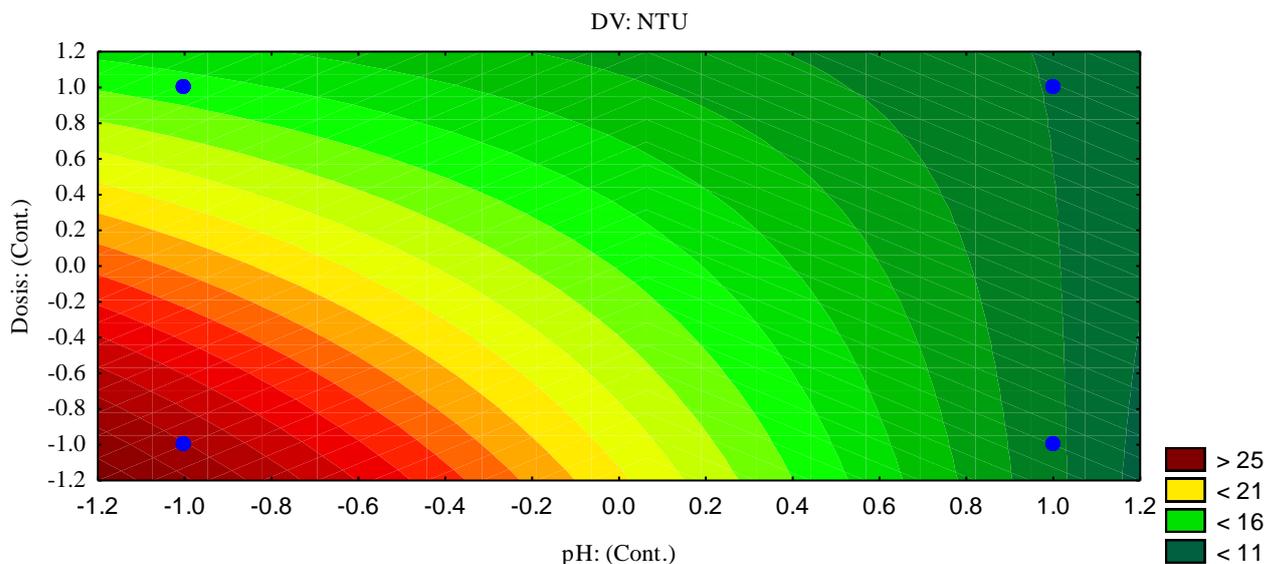
En la figura 3 se observa las variables significativas que son la mezcla rápida y lenta (2y3) y el pH (1), dosis (4) lo cual significa que son las variables que más influyen en la remoción de turbiedad.

Figura. 4 Influencia de los variables independientes en el variable respuesta.



En la figura 4 se observa cómo varía el nivel de turbiedad de acuerdo a pH alto, dosis alta y a una mezcla lenta hay una mejor remoción de turbiedad en comparación a la gráfica de la izquierda.

Figura 5. Fitted Surface; Variable: NTU



En la figura 5 se muestra los variables significativos que inciden en la variable respuesta, en este caso se presenta el modelo matemático:

$$NTU = 16.92 * x + 2.72 * y + 0.03 * x^2 + 1.119 * y^2 + 2.58 * x * y + 0.160 * x + 0.145 * y + 0$$

Donde:

X = pH

Y = Dosis.

Para los pronósticos futuros y con esto demuestran que las variables significativas en el análisis fueron el pH y el gradiente de velocidad para mezcla lenta. Además de esto se observa que el gradiente de mezcla lenta se presenta como factor relevante al interactuar con la dosis de coagulante, los gradientes de mezcla rápida y el pH.

Termino	Efecto	Coefficiente	Coefficiente de EE	T	p
Mean/Interc.	16.92313	21.52351	1.789629	9.45622	0.000223
(1)pH	-4.83688	-0.23649	1.789629	-2.70272	0.042645
(2)M - Rápida	1.49438	6.09476	1.789629	0.83502	0.441766
(3)M - Lenta	1.15938	5.75976	1.789629	0.64783	0.545663
(4)Dosis	-2.72813	1.87226	1.789629	-1.52441	0.187917
1 by 2	0.03187	4.63226	1.789629	0.01781	0.986479
1 by 3	1.11938	5.71976	1.789629	0.62548	0.559093
1 by 4	2.58438	7.18476	1.789629	1.44408	0.208321
2 by 3	-5.01438	-0.41399	1.789629	-2.80191	0.037908
2 by 4	0.16063	4.76101	1.789629	0.08975	0.931968
3 by 4	0.14563	4.74601	1.789629	0.08137	0.938303
R ² = 91.59			R ² (Ajustado) = 89.25		

En la gráfica se muestra que hay variables que tienes un efecto significativo en la variable respuesta por lo valores P, (0.000), además presenta una correlación significativa con una representación 91.59 %.

3. Discusiones

La goma de tara es aprobada por el Servicio de Salud Pública europeo para su uso en el tratamiento de agua potable, junto con otros coagulantes como alumbre (potasio sulfato aluminio). Ya que permite aumentar el tamaño de los flóculos formados por el coagulante inicial, incrementando la sedimentación de impurezas sólidas (Aguilar, 2010) En los estudios realizados por Ada y Martel (2009) afirma que el Cloruro férrico es un coagulante que permite eliminar en gran cantidad sustancias de diversas naturalezas y de peso de materia que son eliminados del agua, también este autor menciona que si el coagulante mal utilizado, es decir si se excede la dosis, el resultado no sería el esperado y sería imposible la clarificación de dicho líquido. El cloruro férrico, se aplica con mayor capacidad de arrastre, requiere ajustes de pH más precisos y es más efectivo en la remoción de partículas coloidales, metales, sulfuros y fosfatos; conduce a un tamaño suficiente de los flóculos que precipitan más fácilmente.

En el experimento realizado la goma de tara tuvo un gran capacidad en la reducción de turbiedad estos mismos resultados se mostraron en la literatura de Febles González et al. (2014) donde los polímeros se usan como ayudantes de floculación, pues se adicionan de 30 a 60 segundos después de haber añadido el coagulante inicial (generalmente aluminio o hierro), cuando las partículas ya se encuentran desestabilizadas.

El número de variables a calcular y la complejidad del proceso de la prueba de jarras, es la razón por la cual los procedimientos convencionales tienen un consumo significativo de tiempo, y un número relativamente alto de experimentos, como se puede concluir del trabajo de Andía (2000) en contraste, las metodologías estadísticas permiten definir los factores variables que tienen una mayor influencia en la variable de respuesta, que permiten entender las interacciones entre las variables, además hay varios estudios de remoción de contaminantes en agua, en los cuales se han utilizado diseño factorial en lugar del método de variación de un solo factor, por ejemplo el trabajo de Trujillo et al., (2014) es sobre coagulación con goma de platano, para remoción de turbiedad. Así, el presente trabajo identificó la influencia de cuatro factores variables sobre la remoción de turbiedad, no como una prueba definitiva de determinación de los valores óptimos, en los estudios futuros los ensayos serían en menor número y se consideraría como variables los factores más relevantes.

4. Conclusiones.

En conclusión, se pudo determinar que la goma de Tara (*Caesalpinia spinosa*) como ayudante en el proceso de coagulación y floculación tiene un gran capacidad de acelerar la formación de flóculos y por ello acelera la sedimentación de los coloides, a una turbiedad de 1000 NTU a una concentración de goma de tara al 0.1 % (10 ml). Además se pudo determinar que los variables más significativos son la mezcla rápida y lenta (2) y el pH (1), dosis (4). El diseño factorial es una herramienta que ayudó a comparar variable independiente y saber el efecto que producen en una variable respuesta. Según el análisis del diseño experimental, los factores que más afectan la remoción son la dosis, mezcla lenta que consiste en la Agitación suave del agua con los coagulantes, con el fin de favorecer la formación de los flóculos, la mezcla rápida que se efectúa mediante turbulencia, provocada por medios mecánicos (prueba de jarra) y el pH de agua. Esta metodología nos permitió definir los factores variables que tienen una mayor influencia para entender las interacciones entre las variables, de tal manera nos permitió reducir el número total de experimentos, ahorrando esfuerzo, tiempo, gastos de insumos y componentes químicos.

El diseño factorial 2^4 permitió evaluar la influencia de distintas variables en la turbiedad para el caso de agua tomada de la fuente natural (Río Rímac), utilizando goma de tara como ayuda de floculación. El diseño 2^4 utilizado comprende un bajo número de ensayos, se obtienen resultados consistentes, además es posible describir el comportamiento de la turbiedad en función a los diferentes variables que influyen directamente. Es por ello que el diseño factorial facilita identificar los parámetros a variar en las pruebas de jarras, y además accede la reducción en el número de pruebas y por lo tanto una reducción de los costos. De esta forma se verificó que el diseño factorial 2^4 contribuye significativamente en la determinación de condiciones óptimas de operación de los procesos de coagulación y floculación.

Referencias

- Ada, Q., & Martel, B. (2009). Capítulo 4 coagulación.
- Aguilar, E. (2010). Aguilar_Ae.Pdf. Lima.
- Andía, Y. (2000). Tratamiento de agua coagulación y floculación. *Sedapal*, 1–44. Retrieved from http://www.sedapal.com.pe/c/document_library/get_file?uuid=2792d3e3-59b7-4b9e-ae55-56209841d9b8&groupId=10154
- Días, W. H., Gonzaga, L. B., & Contreras, C. N. (2007). Determinación Del Coagulante Que Permita La Máxima Remoción De Fosfatos En Agua Cruda Del Río Otún. *Scientia Et Technica*, XIII(34), 607–612. Retrieved from <http://redalyc.uaemex.mx>
- Febles González, J. M., Sobrinho, N. A., López, Y. P., Zoffoli, J. H., Lima Magalhães, M. O., & Guedes, N. (2014). Relación entre los procesos de erosión-sedimentación-contaminación en suelos del Distrito Pecuario “Alturas de Nazareno”, Cuba. (Spanish). *Revista Cubana de Ciencia Agrícola*, 48(2), 173–179. Retrieved from <http://search.ebscohost.com/login.aspx?direct=true&db=zbh&AN=97345606&lang=es&site=ehost-live>
- Lorenzo-Acosta, Y. (2006). Estado del arte del tratamiento de aguas por coagulación-floculación. *Estado Del Arte Del Tratamiento de Aguas Por Coagulación-Floculación ICIDCA. Sobre Los Derivados de La Caña de Azúca*, XL(2), 10–17. Retrieved from <http://www.redalyc.org/articulo.oa?id=223120664002>
- Montes Gazabón, L. E., & Olivero Verbel. (2013). Remoción de la turbidez del agua del río Magdalena usando el mucílago del nopal *Opuntia ficus-indica*. *Producción Más Limpia*, 8(1), 19–27. Retrieved from <http://repository.lasallista.edu.co:8080/ojs/index.php/pl/article/view/437>
- Montgomery, D. (2009). Influence of surface modified nano silica on alkyd binder before and after accelerated weathering. *Polymer Degradation and Stability*. [https://doi.org/10.1016/S0141-3910\(01\)00005-2](https://doi.org/10.1016/S0141-3910(01)00005-2)
- Myslenkov, A. I., & Miquelle, D. G. (2015). Comparison of methods for counting hoofed animal density in Sikhote-Alin. *Achievements in the Life Sciences*, 9(1), 1–8. <https://doi.org/10.1016/j.als.2015.05.001>
- Ramírez, H., Luis, R., & Huaranga, C. (2016). Eficiencia del Reactor Anaerobio de Manto de Lodos de Flujo Ascendente (UASB) a escala piloto en el Tratamiento de las Aguas Residuales Domésticas provenientes de la comunidad de Carapongo - Luriganchó , Chosica, 7–23.
- Tapia, N. H., Mamani, S. C., Rojas, N. P., & Yarango, A. R. (2010). Estudio de la coagulación del sistema coloidal de $Fe(OH)_3$ por acción de la goma de tara. *Rev.*

Per. Quím. Ing. Quím., 13, 104–108. Retrieved from
<http://revistasinvestigacion.unmsm.edu.pe/index.php/quim/article/view/4729/3803>
Trujillo, D., Duque, L. F., Arcila, J. S., Rincón, A., Pacheco, S., & Herrera, O. F.
(2014). Remoción de turbiedad en agua de una fuente natural mediante
coagulación / floculación usando almidón de plátano Turbidity removal in a water
sample from a natural source via coagulation / flocculation using plantain starch
Remoção de turbidez em água de. *Revista ION*, 27(1), 17–34.