

# **DOSIS ÓPTIMA EN MEZCLAS DE SULFATO DE ALUMINIO Y POLÍMEROS NATURALES PARA LA CLARIFICACIÓN DEL RÍO TUY, ESTADO MIRANDA**

**(Optimal dosage in mixed aluminum sulfate and natural polymers for clarification of Tuy River, Miranda state)**

<sup>1</sup>José F. Hernández G. <sup>2</sup>Ysabel C. Urbina M. <sup>3</sup>Marlenis Aguilar. <sup>4</sup>Miguel García y <sup>5</sup>José Landaeta.

<sup>1</sup>Ing. Agroindustrial. UNELLEZ – San Carlos, Venezuela.

<sup>2</sup>Ingeniero Agroindustrial. Magister en Ingeniería Agroindustrial. UNELLEZ – San Carlos, Venezuela e-mail [urbinaisabel1975@gmail.com](mailto:urbinaisabel1975@gmail.com)

<sup>3</sup>RN V-10325814-01-2013, INVESTIGADOR, PEII Categoría: Nivel: A-1, área de investigación: Ambiente y línea de investigación: Tratamiento de agua. Ing. Químico. Magister en Ingeniería Ambiental (UCAB). Profesional II del Ministerio del Poder Popular para el Ambiente, San Carlos, Venezuela e-mail [marlenisaguilar9@gmail.com](mailto:marlenisaguilar9@gmail.com)

<sup>4</sup>Ingeniero Industrial. Magister en Ingeniería Industrial (UC), Venezuela e-mail

[ipamiguel1@gmail.com](mailto:ipamiguel1@gmail.com)

<sup>5</sup> Licenciado en Educación Mención Química. UNELLEZ – San Carlos, Venezuela e-mail [joselan886@hotmail.com](mailto:joselan886@hotmail.com)

Recibido: 01- 02-2015 / Aceptado: 26-04-201

## **RESUMEN**

El proceso de floculación para potabilizar agua requiere del uso de sulfato de aluminio, sin embargo existen polímeros naturales que están utilizando como ayudantes de floculación. En esta investigación se trabajó con agua captada del Río Tuy, la cual fue caracterizada de acuerdo con los parámetros establecidos para clasificar afluentes contenidos en la gaceta oficial 5021, decreto 883, indicando que se ubica en afluente tipo 1B. La dosis óptima de sulfato de aluminio en la prueba de jarra se encontró entre 40-60 ppm. Los tratamientos para la clarificación del agua se ejecutaron por medio de una matriz experimental con diseño Box-Behnken, dos factores experimentales  $X_1$ : Sulfato de aluminio (ppm) y  $X_2$ : Almidón de yuca (ppm) a tres niveles cada uno y tres respuestas; turbidez (NTU), color y pH. En los análisis de varianza para las respuestas  $Y_1$ ,  $Y_2$  y  $Y_3$  los valores de p para los tratamientos y de la regresión fueron inferiores a 0,01 indicando que existe una diferencia estadística altamente significativa con respecto a la variabilidad de la clarificación del agua en relación a la floculación de los sólidos en función de los factores experimentales  $X_1$  y  $X_2$  con un nivel de confianza del 95%, pudiéndose rechazar la hipótesis nula a favor de la

alternativa. La co-optimización de las respuestas de clarificación de agua del Río Tuy, permitió alcanzar una deseabilidad de 99,03%, con valores de  $X_1$ : sulfato de aluminio (36 ppm) y  $X_2$ : almidón de yuca (4,01 ppm), para obtener como respuestas de clarificación  $Y_1$ : turbidez (2,65 NTU),  $Y_2$ : color (19,39) y  $Y_3$ : pH (7,99).

**Palabras clave:** floculación, sulfato de aluminio, polímeros naturales.

## SUMMARY

The flocculation process for drinking water requires the use of aluminum sulphate, but there are natural polymers that are used as flocculation assistants. In this research water collected from Tuy River was characterized according to parameters established for classifying tributaries contained in the official gazette 5021, Decree 883, indicating that it is located as a tributary type 1B. The optimal dose of aluminum sulphate in jar test was between 40-60 ppm. Treatments for water clarification were implemented through an experimental matrix with Box-Behnken design, two experimental factors  $X_1$ : aluminum sulfate (ppm) and  $X_2$ : cassava starch (ppm) to three levels each and three responses; turbidity (NTU), color and pH. In the analysis of variance for  $Y_1$ ,  $Y_2$  and  $Y_3$  responses, p values for treatments and regression were lower than 0.01, indicating that there is a highly significant statistical difference to the variability of water clarification regarding flocculation of solids based on experimental factors  $X_1$  and  $X_2$  with a confidence level of 95%, being able to reject the null hypothesis in favor of the alternative. The multi co-optimization of responses for clarification of Tuy River water, allowed to reach a desirability of 99.03%, with values of  $X_1$  (36 ppm) and  $X_2$  (4.01 ppm) to obtain clarification responses as  $Y_1$  (2.65 NTU),  $Y_2$  (19.39) and  $Y_3$  (7.99).

**Keywords:** flocculation, aluminum sulfate, natural polymers.

## INTRODUCCIÓN

El ambiente es la interacción entre los diferentes elementos naturales y sociales que se relacionan estrechamente, en los cuales se desarrolla la vida de los organismos y que permite coexistir de forma sana y completa, pero este se ve afectado por un tema que no es desconocido por muchos y son los hechos que provocan las diferentes formas de contaminación que actualmente acechan a la humanidad y que sin una medida controlada se están acelerando cada día más, trayendo consecuencias fatales al planeta, siendo una de la más importante la contaminación del agua que como motor de desarrollo y fuente de riqueza, ha constituido uno de los pilares fundamentales para el progreso del hombre y su coexistencia, ya que dependemos en su totalidad de ella. Pero esta agua posee

características no adecuadas para su consumo y tiene que ser tratada para consumo humano por no reunir los requisitos legales de ingesta y por las medidas inconsciente de algunos que la contaminan progresivamente. De allí que es necesario innovar en el progreso de tratamiento de aguas para potabilizar logrando procesos más eficientes, rápidos y menos costosos adecuados a las normas vigentes.

Las grandes ciudades dependen de abastecimiento superficial y en la mayoría de los casos sus fuentes son corrientes, lagos o embalses (Guerrero, 1979). En el proceso de potabilización de las aguas, la clarificación es una de las etapas más importantes ya que permite la remoción de materiales de naturaleza coloidal en suspensión. El objetivo de esta investigación es el de eliminar la mayor cantidad de impurezas y contaminantes, sólidos minerales y sales inorgánicas, mediante una serie de operaciones (procesos físicos y químicos), mediante la utilización de sulfato de aluminio y poli electrolitos como el almidón de yuca para mejorar los proceso de coagulación y floculación, en la obtención de un producto transparente, incoloro, insípido, sin presencia de suciedades, presentando así un agua de calidad en los estándares de claridad, color y pH, totalmente confiable y adecuado a la norma.

## **MATERIALES Y MÉTODOS**

La investigación es de carácter descriptivo y analítico, se trabajó bajo diseño experimental Box-Behnken, y los resultados se analizaron a través del análisis de varianza, los gráficos de superficie de respuesta y perfiles de deseabilidad, mediante el uso de los softwares Statistica v.7.0 y JMP v. 4.0, tomando en cuenta que no se violen los supuestos de los diferentes análisis de varianza.

La población de la investigación consiste en el volumen de agua tomado del afluente, Rio Tuy ubicado en el municipio Yare estado Miranda, que fue de 60 litros bajo estrictas características de captación en el kilómetro 12 del río, la cual fue tomada para realizar los análisis de caracterización y aplicación de tratamientos de avanzadas.

La unidad experimental del ensayo consistió en tomar de los 60 litros de agua captada, una secuencia de seis litros de agua separados en seis beakers de 1000 ml de capacidad cada uno, para los tratamientos de jarra y así determinar la dosificación óptima de sulfato de aluminio, que requiere la muestra bajo las condiciones de caracterización, posteriormente se tomaron seis litros de agua para los análisis de variables en las mezclas propuestas por el diseño en una matriz codificada de tipo factorial con un punto central fijo, partiendo de parámetros establecidos por criterios del 10% de almidón de yuca a las mezcla con sulfato de aluminio con dosis más óptimas de sulfato.

## DISEÑO DE LA INVESTIGACIÓN

Se trabajó con diseño experimental tipo Box-Behnken para 2 factores de estudio con 3 niveles cada uno; resultando 9 tratamientos más 3 puntos centrales (PC) adicionales, para un total de 12 tratamientos aleatorizados completamente, como se presenta en el cuadro 1.

**Cuadro 1.** Matriz “D” codificada de diseño Box-Behnken.

| Tratamientos | X <sub>1</sub> :          | X <sub>2</sub> :      |
|--------------|---------------------------|-----------------------|
|              | Sulfato de aluminio (ppm) | Almidón de yuca (ppm) |
| 1            | 0                         | 0                     |
| 2            | 0                         | 0                     |
| 3            | 1                         | 1                     |
| 4            | 0                         | -1                    |
| 5            | 0                         | 1                     |
| 6            | -1                        | 0                     |
| 7            | 0                         | 0                     |
| 8            | 1                         | 0                     |
| 9            | -1                        | 1                     |
| 10           | 0                         | 0                     |
| 11           | -1                        | -1                    |
| 12           | 1                         | -1                    |

**Fuente propia.**

A continuación en el cuadro 2, se presentan las dosis o niveles (-1, 0, 1) de estudio para los factores experimentales.

**Cuadro 2.** Niveles de estudio para los factores experimentales.

| Factores                                   | Niveles |    |    |
|--------------------------------------------|---------|----|----|
|                                            | -1      | 0  | 1  |
| X <sub>1</sub> : Sulfato de aluminio (ppm) | 36      | 45 | 54 |
| X <sub>2</sub> : Almidón de yuca (ppm)     | 4       | 5  | 6  |

**Fuente propia.**

## RESULTADOS Y DISCUSIÓN

El afluyente fue caracterizado con parámetros para agua potable, para establecer su clasificación de acuerdo a la norma. Los análisis de agua fueron realizados siguiendo la metodología establecida en el Standard Methods For the Examination of Water and Wastewater en su 17 edición. Las muestras fueron captadas siguiendo el procedimiento establecido en la norma COVENIN 2709.

Del análisis de los resultados mostrados en el cuadro 3, se considera lo siguiente: en los afluentes del Río Tuy en la Planta de Captación, los siguientes parámetros exceden el límite máximo permitido en la Gaceta Oficial. Nº 36.395, para aguas potables: Coliformes fecales y totales, color, hierro, nitritos y turbiedad.

**Cuadro 3.** Resultados tg 0712: Parámetros para agua potable.

| PARÁMETRO                              | REFERENCIA             | RESULTADO | Límite      |
|----------------------------------------|------------------------|-----------|-------------|
| Cloruros (mg/L)                        | 4500 Cl- A             | 59,23     | 300,00      |
| Coliformes Fecales (NMP/100 ml)        | 9211 C                 | >1600     | < 2         |
| Coliformes Totales (NMP/100 ml)        | 9221 B                 | >1600     | < 2         |
| Color Real (Unidades de Pt – Co)       | Instrumental           | 40,00     | 15 (25) (A) |
| Oxígeno Disuelto (mg/L)                | 4500-OC                | 7,00      | -----       |
| Dureza total (mg/L)                    | 2340 C                 | 49,50     | 500,00      |
| Hierro (mg/L)                          | 4500 Fe B              | 0,72      | 0,30        |
| Potencial de Hidrógeno (pH)            | Instrumental           | 8,08      | 6,5 – 8,5   |
| Nitritos (mg/L)                        | 4500-NO <sub>2</sub> B | 2,66      | 0,03        |
| Nitratos (mg/L)                        | 4500-NO <sub>3</sub> B | 16,28     | 45,00       |
| Conductividad (µS)                     | Instrumental           | 262,00    | -----       |
| Turbiedad (NTU)                        | Instrumental           | 21,60     | 5 (10) (A)  |
| Alcalinidad (mg CaCO <sub>3</sub> / L) | 2320 B                 | 6,00      | -----       |

**Fuente propia.**

En el cuadro 4, se observa que a medida que se incrementa la concentracion del sulfato de aluminio mejora la turbiedad, mientras que el color y el pH se mantienen casi constantes. De allí, surge la iniciativa de emplear concentraciones del sulfato de aluminio en un rango comprendido entre 30 a 60 ppm.

**Cuadro 4.** Resultados que determinan la dosis óptima de sulfato de aluminio.

| Tratamientos | ml de agua | Sulfato de aluminio | Turbiedad | Color   | pH        |
|--------------|------------|---------------------|-----------|---------|-----------|
|              |            |                     | 0 – 10    | 15 - 25 | 6.5 – 8.5 |
| 1            | 100 ml     | 10 ppm              | 14,05     | 40      | 7,9       |
| 2            | 100 ml     | 20 ppm              | 3,76      | 20      | 7,9       |
| 3            | 100 ml     | 30 ppm              | 2,49      | 20      | 7,7       |
| 4            | 100 ml     | 40 ppm              | 1,18      | 20      | 7,6       |
| 5            | 100 ml     | 50 ppm              | 0,68      | 20      | 7,8       |
| 6            | 100 ml     | 60 ppm              | 0,88      | 20      | 7,8       |

**Fuente propia.**

## **ANÁLISIS ESTADÍSTICOS DE LOS RESULTADOS DE LA MATRIZ DE DISEÑO EXPERIMENTAL**

La investigacion se realizó bajo un diseño Box-Behnken, donde la matriz experimental contó con dos factores experimentales  $X_1$ : Sulfato de aluminio (ppm) y  $X_2$ : Almidón de yuca (ppm) y cuatro repeticiones del punto central completamente aleatorizado, donde además, como variables de respuestas se tienen  $Y_1$ : Turbidez (NTU),  $Y_2$ : Color y  $Y_3$ : pH, variables que se emplearan como guias en el proceso de clarificación del agua del Rio Tuy ubicado en los Valles del Tuy del estado Miranda. Las unidades experimentales se ejecutaron tal como se observa en el cuadro 5, dichos datos se analizarán mediante análisis de varianza, graficos de superficie de respueta y la co-optimización de las variables independientes del estudio, tambien se realizó la verificación del cumplimiento con los supuestos del analisis de varianza.

En el cuadro 5, se observan todos los tratamientos realizados en los cuales se evaluaron las diferentes concentraciones y combinaciones de los factores de estudio (sulfato de

aluminio y almidón de yuca), así como su influencia sobre los parámetros analizados (pH, color y turbidez). Aquí se puede apreciar que los tratamientos números 3, 4, 5 y 10 cumplen con los límites máximos permitidos establecido en la Gaceta Oficial N° 36.395, para el caso de agua potable.

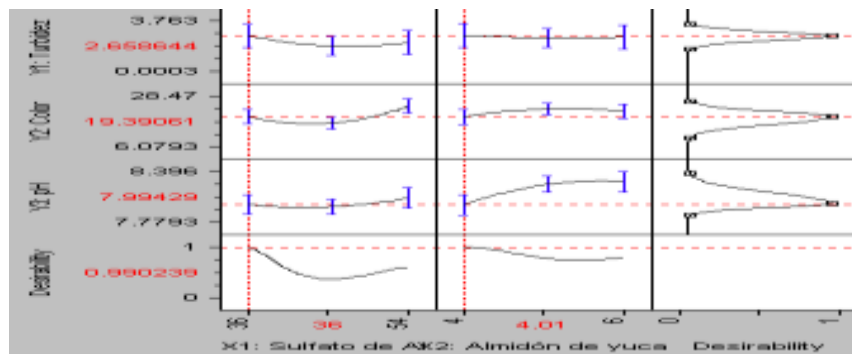
**Cuadro 5.** Matriz experimental, de diseño Box-Behnken con 9 unidades experimentales y 3 puntos centrales adicionales a 3 niveles de estudio.

| Tratamientos | X <sub>1</sub> :    | X <sub>2</sub> : | Y <sub>1</sub> : | Y <sub>2</sub> : | Y <sub>3</sub> : |
|--------------|---------------------|------------------|------------------|------------------|------------------|
|              | Sulfato de aluminio | Almidón de yuca  | Turbidez         | Color            | pH               |
|              | (ppm)               | (ppm)            | (NTU)            |                  |                  |
| 1            | 45                  | 5                | 1,60             | 18,0             | 8,15             |
| 2            | 45                  | 5                | 1,53             | 17,0             | 8,20             |
| 3            | 54                  | 6                | 0,81             | 10,0             | 8,00             |
| 4            | 45                  | 4                | 1,38             | 15,0             | 7,90             |
| 5            | 45                  | 6                | 1,60             | 10,0             | 8,05             |
| 6            | 36                  | 5                | 2,68             | 22,0             | 8,18             |
| 7            | 45                  | 5                | 1,67             | 15,0             | 8,10             |
| 8            | 54                  | 5                | 1,12             | 18,0             | 8,11             |
| 9            | 36                  | 6                | 2,25             | 22,0             | 8,29             |
| 10           | 45                  | 5                | 1,10             | 15,0             | 8,11             |
| 11           | 36                  | 4                | 2,80             | 20,0             | 8,03             |
| 12           | 54                  | 4                | 2,53             | 25,0             | 8,10             |

**Fuente propia.**

## CO-OPTIMIZACIÓN MULTIRESPUESTA PARA LAS VARIABLES DE CLARIFICACIÓN DE AGUA DEL RÍO TUY

En este ensayo la co-optimización se fundamentó en minimizar las respuestas de clarificación de agua tratada con sulfato de aluminio como floculante de sólidos en suspensión y almidón nativo de yuca como ayudante de floculación. Cabe destacar que la importancia de este estudio se basa en disminuir las concentraciones de sulfato de aluminio con combinaciones de polímeros naturales (polielectrólitos), la cual permitió alcanzar una deseabilidad 99,03%, con valores de X<sub>1</sub>: sulfato de aluminio (36 ppm) y X<sub>2</sub>: almidón de yuca (4,01 ppm), para obtener como respuestas de clarificación Y<sub>1</sub>: turbidez (2,65 NTU), Y<sub>2</sub>: Color (19,39) y Y<sub>3</sub>: pH (7,99) tal como se muestra en la figura 1.



**Figura 1.** Co-optimización multirespuesta para las variables de clarificación de agua del río Tuy.

## CONCLUSIONES

Los resultados obtenidos en el presente trabajo lograron comprobar que las mezclas de sulfato de aluminio con almidón de yuca tienen buena calidad como coagulante y floculante y pueden ser utilizados en el tratamiento físico y químico de las aguas superficiales.

En los análisis de varianza para las respuestas  $Y_1$ ,  $Y_2$  y  $Y_3$  los valores de  $p$  para los tratamientos y de la regresión fueron inferiores a 0,01 indicando que existe una diferencia estadística altamente significativa con respecto a la variabilidad de la clarificación del agua con respecto a la floculación de los sólidos en función de los factores experimentales  $X_1$ : Sulfato de aluminio (ppm) y  $X_2$ : Almidón de yuca (ppm) con un nivel de confianza del 95%, pudiéndose rechazar la hipótesis nula a favor de la alternativa.

Los coeficientes de determinación de los modelos de  $R^2$  para cada respuesta fueron superiores al 80%, indicando que dicha variabilidad en las respuestas  $Y_1$ ,  $Y_2$  y  $Y_3$ , es explicada por los factores experimentales probados  $X_1$  y  $X_2$  con los niveles experimentales utilizados bajo las condiciones en que se montó el experimento.

La co-optimización de las respuestas de clarificación de agua del Río Tuy, permitió alcanzar una deseabilidad 99,03%, con valores de  $X_1$ : sulfato de aluminio (36 ppm) y  $X_2$ :

almidón de yuca (4,01 ppm), para obtener como respuestas de clarificación Y<sub>1</sub>: turbidez (2,65 NTU), Y<sub>2</sub>: Color (19,39) y Y<sub>3</sub>: pH (7,99).

## REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Bratby, J., 2006. Coagulants, in Coagulation and Flocculation in Water and Wastewater Treatment, 2nd ed., IWA Publishing, London. Pp. 50- 68.

Covenin 2709. (2002). Norma Venezolana, Aguas naturales, industriales y Residuales, Guía para la técnicas de muestreo. Consulta: Mayo 2014.

Disponible: <http://www.sencamer.gob.ve/sencamer/normas/2709-02.pdf>

Guerrero R. 1979. Manual de Tratamiento de aguas. Limusa. México, 316 p.

Métodos normalizados para el análisis de aguas potables y residuales. 1996. APHA,

AWWA, WPCF, 17 edición, ediciones Díaz de Santos, S.A. Pp 10-234.

ONU-Agua. 2009. 3er Informe de las Naciones Unidas sobre el desarrollo de los recursos hídricos en el mundo: El agua en un mundo en constante cambio. 5º Foro Mundial del Agua en Estambul, Turquía el 16 de marzo de 2009. Disponible: <http://webworld.unesco.org/water/wwap/wwdr/wwdr3/tableofcontents.shtml>