

Diseño factorial para el estudio de un clarificante natural para el proceso de potabilización de aguas

Jorge Emilio Almazán, Dolores Gutiérrez Cacciabue y Verónica Beatriz Rajal

Instituto de Investigaciones para la Industria Química (INIQUI), Facultad de Ingeniería, Universidad Nacional de Salta. Salta.

emilioalmazan8787@gmail.com, +54-387-4255553

RESUMEN.

Un proceso limitante y por ende de suma importancia en la potabilización del agua es la clarificación de la misma, es decir la remoción de sólidos en suspensión que provocan su turbidez y color. Convencionalmente se usan diferentes coagulantes que son sales metálicas, siendo el sulfato de aluminio el más usado a nivel mundial. Sin embargo, la presencia de trazas de esta sal en muestras de aguas potabilizadas representa un riesgo para la salud humana. Por este motivo, se comenzó a estudiar la implementación de clarificantes o coagulantes naturales de origen vegetal, lo que implicaría una disminución en los costos de potabilización, la posibilidad de que la población tenga acceso a ellos y la prevención de riesgos para la salud. Las variables más relevantes en el proceso de sedimentación son la concentración de sólidos y el pH de la matriz acuosa y la dosis de coagulante utilizada. En este trabajo se realizó un análisis factorial para determinar la influencia de estas tres variables en la remoción de turbidez del agua tratada usando un clarificante natural (mucílago de penca de tuna). Los resultados demostraron la potencialidad de este clarificante y que la concentración de sólidos es el parámetro más influyente en la clarificación.

Palabras Claves: clarificación, penca de tuna, sulfato de aluminio, diseño factorial.

INTRODUCCIÓN

En nuestra provincia, Salta, existen zonas rurales en donde la población carece de una red de agua potable y se abastece de agua de ríos o pozos poco profundos los cuales no cuentan con ningún tipo de tratamiento previo. Esto se suma al inconveniente que durante el verano que es la estación húmeda, el caudal de los ríos aumenta considerablemente, resuspendiendo partículas sólidas (con microorganismos adheridos en algunos casos) principalmente de un tamaño pequeño que ocasionan el aumento en la turbidez del agua [1] lo que la convierte en mucho menos apta para su consumo. Estos hechos se traducen en el elevado número de enfermedades hídricas que presenta Salta, las cuales afectan principalmente a niños y ancianos, lo que hace imperativo desarrollar nuevas alternativas para el tratamiento de agua, que sean afines y se adapten a la realidad de la región estudiada.

La clarificación de aguas para consumo humano es una etapa sumamente importante dentro del proceso de potabilización e implica la remoción de turbiedad y color del agua. Esta consiste en la sedimentación por gravedad de la materia en suspensión presente en las matrices acuosas [2]. Hay casos en los que la turbiedad y el color del agua son causados por partículas muy pequeñas, llamadas coloidales, como ser óxidos de metales, arcillas, flóculos de bacterias, etc. Éstos coloides tienen la característica de permanecer en suspensión por tiempo prolongado ya que no poseen el peso suficiente para sedimentar y pueden atravesar un medio filtrante muy fino. En esta situación es necesario recurrir al uso de coagulantes que son compuestos químicos que ocasionan que las partículas finas que se encuentran en

suspensión se agrupan, formando flóculos lo que colabora a su precipitación y remoción (coagulación- floculación) [3].

En la actualidad, existen en el mercado muchos coagulantes comerciales que son sales metálicas como el sulfato de aluminio, el cloruro férrico y el sulfato ferroso [3],[4], siendo el primero el más utilizado a nivel mundial. Sin embargo, algunos estudios han informado que en análisis realizados a muestras de aguas potabilizadoras se encontraron trazas de sulfato de aluminio, lo que representa un riesgo potencial para la salud humana, debido a la relación entre el aluminio residual y diferentes enfermedades neurológicas y cánceres [5],[6]. A partir de esto, surge el interés en utilizar coagulantes naturales de origen vegetal, entre ellos los extractos derivados de la penca de tuna (*Opuntia ficus indica miller*), para clarificar aguas superficiales turbias. Esta planta es parte del paisaje natural de la provincia de Salta ya que las condiciones ambientales son particularmente favorables para su crecimiento y se la encuentra asilvestrada cerca de los caminos y poblaciones [7].

Uno de los aspectos más importante a analizar cuando se estudia el poder coagulante de alguna sustancia en particular, es encontrar la interacción de algunas variables de operación, entre las que se destacan principalmente el pH, la concentración de sólidos y la dosis de clarificante con la remoción de turbidez. Con este fin, resulta práctico plantear un diseño factorial ya que permite definir los factores variables que tienen una mayor influencia en la variable de respuesta con las siguientes ventajas: permite entender las interacciones entre variables, permite reducir el número total de experimentos, ahorrando esfuerzo y tiempo, ahorrando gastos de insumos y componentes químicos [8].

Por todo lo expuesto anteriormente el objetivo de este trabajo fue aplicar un diseño factorial 2x3 (dos niveles: máximo y mínimo y 3 variables: pH, concentración de sólidos y dosis de clarificante o coagulante) para identificar los factores variables con mayor efecto en la remoción de turbidez y las interacciones entre los factores variables, usando como clarificante natural *Opuntia ficus indica* (tuna).

METODOLOGÍA

Se planteó un diseño factorial de 3 variables y 2 niveles (máximo y mínimo). Las variables estudiadas fueron el pH, dosis de clarificante natural y concentración de sólidos (Tabla 1). Los niveles de pH y concentración de sólidos fueron elegidos de acuerdo a datos recolectados en los ríos de la provincia de Salta y los niveles de dosis de clarificante de acuerdo a la practicidad para su aplicación en el caso que sea usado por personas que vivan en comunidades rurales.

Factor Variable	Valor mínimo (-1)	Valor máximo (+1)
pH	6	9
Dosis de coagulante (g/L)	1	2
Concentración de sólidos (g/L)	1,25	5

Tabla 1: Niveles de las diferentes variables utilizadas

Para determinar la remoción de turbidez se realizaron diferentes ensayos de acuerdo a las diferentes variables y niveles estudiados (Tabla 2). Cada ensayo consistió en la preparación de matrices acuosas en vasos de precipitados de 1 L a las cuales se les adicionó 500 ml de agua destilada y una cantidad determinada de partículas sólidas de $< 45 \mu\text{m}$ de diámetro recogidas del lecho del Río Wierna (La Caldera, Salta). Este tamaño de partículas fue elegido para trabajar con partículas coloidales. A las diferentes matrices se le fijó el pH correspondiente

adicionando gotas de soluciones diluidas de Na(OH) y HNO₃ 1 N hasta alcanzar el valor deseado.

Previamente se recolectó penca de tuna de la localidad de Vaqueros (Salta) y se la mantuvo a temperatura ambiente hasta su uso. Para la correcta preparación del mucílago de penca de tuna como coagulante, se la peló y se cortó el mucílago en cuadrados de 1 cm de lado aproximadamente [9]. Todo esto manteniendo las condiciones de esterilidad y cuidados necesarios para no contaminar el mucílago.

A cada matriz se le midió la turbidez inicial (Ti, UNT, unidades nefelométricas de turbidez) antes de agregar el mucílago de tuna utilizando un medidor multiparamétrico Horiba. Realizado esto, se adicionó el coagulante natural fresco en sus diferentes concentraciones, de acuerdo al experimento (Tabla 2). Todos los ensayos se realizaron por triplicado.

Para evaluar el poder de sedimentación del floculante natural se utilizó el test de jarra mediante el equipo Parsec JarTest. Se fijó la velocidad de agitación en un valor de 160 rpm durante 1 minuto seguida de una velocidad de 15 rpm por 15 minutos. Estas fueron las condiciones óptimas para la sedimentación determinadas en trabajos anteriores [9]. Una vez finalizado los ensayos, se determinó la turbidez final (Tf, UNT). Con los datos de turbidez inicial y final se calculó la remoción de turbidez:

$$\text{Remoción de turbidez (\%)} = [(Ti - Tf) / (Ti)] \cdot 100 \quad (1)$$

Con los datos obtenidos se calcularon los efectos principales de cada factor y la interacción entre ellos sobre la variable de respuesta que fue la remoción de turbidez.

Experimento	pH	Dosis de coagulante	Concentración de Sólidos
1	-1	-1	-1
2	+1	-1	-1
3	-1	+1	-1
4	+1	+1	-1
5	-1	-1	+1
6	+1	-1	+1
7	-1	+1	+1
8	+1	+1	+1

Tabla 2: Diferentes experimentos realizados.

DESARROLLO

Los resultados obtenidos se resumen en la Gráfica de Cubos (Fig. 1). Se pudo observar que la mayor remoción de turbidez se logró en todos los casos cuando la concentración de sólidos era la máxima (5 g/L). Esto pudo deberse a que la matriz con mayor concentración de sólidos facilitó la formación de flóculos y su posterior coagulación a diferencia de aquellos casos en donde la concentración de sólidos era menor, obteniéndose un menor porcentaje de remoción de turbidez.

La mayor remoción de turbidez obtenida (aproximadamente 99%) fue cuando se trabajó con las condiciones del experimento 5: con un pH de 6, una dosis de coagulante de 1 g/L y una concentración de sólido de 5 g/L, mientras que la menor remoción de turbidez (aproximadamente de 83%) fue con el experimento 4: un pH de 9, una dosis de coagulante de 2 g/L y una concentración de sólidos de 1,25 g/L.

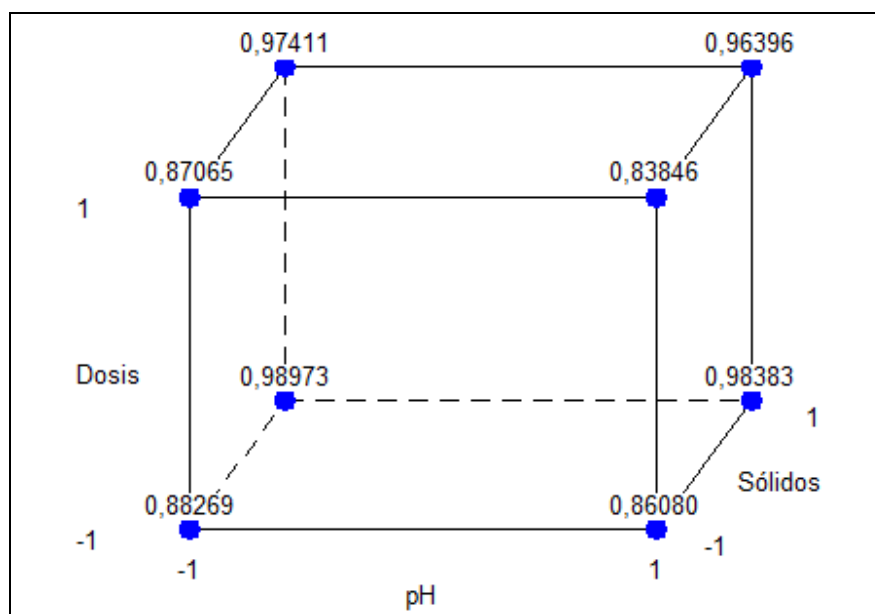


Figura 1: Gráfica de cubos. Los puntos representan una media del valor de la variable respuesta (remoción de turbidez) para los diferentes experimentos.

Se calculó cuáles fueron los efectos más significativos en la remoción de turbidez (Fig. 2). Se observó que la variable más influyente fue la concentración de sólidos, seguido por el pH y la dosis de coagulante utilizado (estos dos presentaron un efecto similar). La interacción entre las variables pH y sólidos también fue significativa sobre la remoción de turbidez, a diferencia de las otras interacciones entre variables.

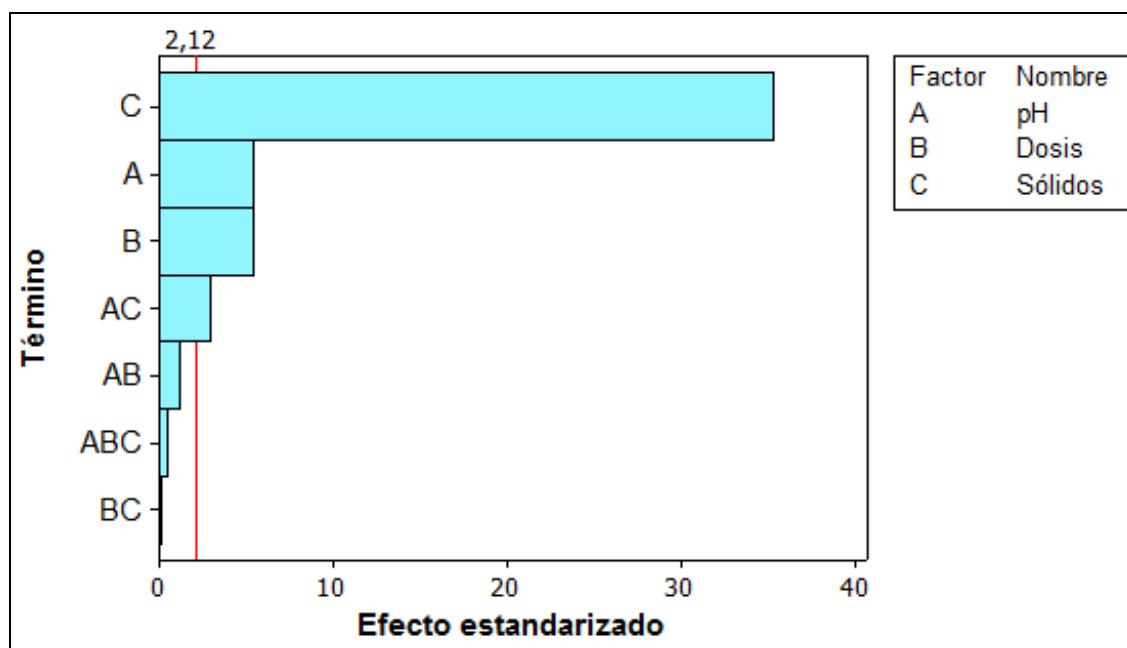


Figura 2: Gráfico de Pareto de efectos para la variable respuesta de remoción de turbidez. Se utilizó un alfa de 0,05.

Se calcularon los efectos factoriales principales que son el impacto global de cada factor considerado de forma independiente (Fig. 3). Como en ninguno de los casos la línea fue horizontal, entonces, existe un efecto principal presente. Los diferentes niveles de los factores afectaron la remoción de turbidez de manera diferente. La concentración de sólidos tiene la mayor magnitud de efecto principal (mayor pendiente) y ésta es positiva, es decir que mientras mayor sea esta variable, mayor es la remoción de turbidez. Las otras dos variables presentaron una pendiente negativa similar entre ellas y fue menor que la anterior, lo que implica que el pH y la dosis de clarificante son inversamente proporcionales a la remoción de turbidez y tiene un efecto similar sobre ella.

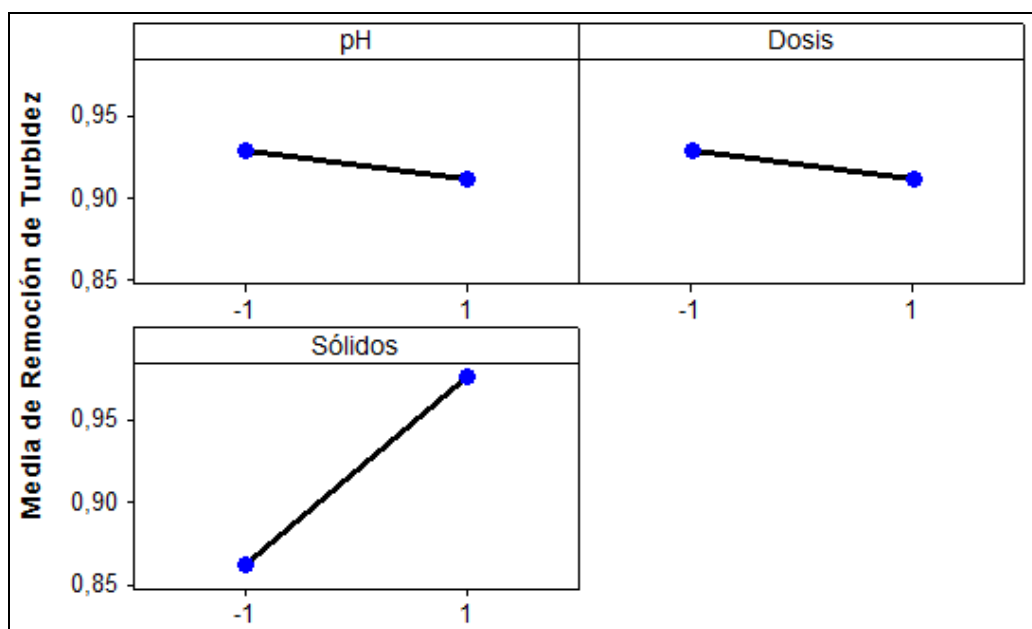


Figura 3: Gráfica de efectos principales para la remoción de turbidez.

En la Tabla 3 se resumen los resultados del diseño factorial. Se puede comprobar lo que se analizó anteriormente con las gráficas. La concentración de sólidos, el pH, la dosis de coagulante y la combinación del pH y la concentración de sólidos fueron las variables significativas en los ensayos realizados. El modelo matemático provisto por el diseño factorial tuvo muy buen ajuste con los datos experimentales ($R^2=98,80\%$)

Término	Efecto	Coef.	p
Constante		0,920528	0,000
pH	-0,01753	-0,008734	0,000
Dosis de Coagulante	-0,017469	-0,008734	0,000
Concentración de Sólidos	0,114756	0,057378	0,000
pH*Dosis	-0,00364	-0,00182	0,279
pH* Conc. Sólidos	0,009506	0,004753	0,01
Dosis* Conc. Sólidos	-0,000277	-0,000139	0,933
pH*Dosis*Conc.Sólidos	0,00151	0,000755	0,648

Tabla 3: Resultados del diseño factorial. $R^2= 98,80\%$

CONCLUSIONES

Se pudo comprobar la potencialidad del uso de un coagulante natural como lo es el mucílago de penca de tuna, que está disponible y es abundante a nivel local para la clarificación de matrices acuosas turbias. En el presente estudio, se encontró una máxima remoción de turbidez (99%) usando este clarificante natural cuando se trabajó a un pH de 6, con una matriz acuosa de concentración de sólidos de 5 g/L y una dosis de clarificante de 1 g/L. También se determinó que la concentración de sólidos es la variable que más influye en el proceso de sedimentación, y que el pH y la dosis del floculante tienen un efecto similar sobre la variable respuesta. La utilización de este clarificante natural implicaría un gran avance en materia de tratamiento de agua porque significaría un abaratamiento de los costos del proceso de potabilización de agua, la posibilidad de que toda la población tenga acceso al mismo (ya que es un producto regional) y la desaparición de riesgos para la salud por su consumo.

BIBLIOGRAFÍA

- [1] BAUDINO, G. (2007). Hidrogeología del Valle de Lerma, Provincia de Salta, Argentina. Tesis Doctoral. Salta: Facultad de Ciencias Naturales, Universidad Nacional de Salta.
- [2] CASIDAY, R.; NOELKEN, G.; FREY R. (1999). Treating the Public Water Supply: What Is In Your Water, and How Is It Made Safe to Drink? Department of Chemistry, Washington University.
- [3] RAMALHO, R. S. (1990). Tratamiento de aguas residuales. Editorial Reverté. Barcelona, España.
- [4] SOLÍS SILVAN, R.; LAINES CANEPA, J. R.; HERNÁNDEZ BARAJAS, J. R. (2012). Mezclas con potencial coagulante para clarificar aguas superficiales. Revista Internacional de Contaminación Ambiental, México, v.28, n.3, p.229-236.
- [5] BRATBY, J. (2006) Coagulation and flocculation in water and wastewater treatment. IWA, p.424.
- [6] COLBERT, D. (2007). Los siete pilares de la salud. Casa Creación. p.314.
- [7] LOZANO, L. (2011). Ecofisiología de la tuna (*Opuntia ficus-indica* (L.) Mill.). Avances en Horticultura –Review. Disponible en www.horticulturaar.com.ar
- [8] BOX, G.E. P., HUNTER J. S., HUNTER, W. G. (2008). Estadística para investigadores : diseño, innovación y descubrimiento, segunda edición. Editorial Reverté. Barcelona, España.
- [9] SALAS AGUERO, S.E. (2013). Ensayos de clarificación con extractos derivados de la Tuna, Informe final de Beca de investigación para estudiantes avanzados. CIUNSa. Universidad Nacional de Salta.