

DIFERENTES ALTERNATIVAS PARA LA PRODUCCIÓN DE AGUA SEGURA USANDO TECNOLOGÍAS NO CONVENCIONALES

Almazán, Jorge Emilio; Corte, Enzo Marcelo; Cervantes Schamun, Miguel; Gutiérrez

Cacciabue, Dolores; Rajal, Verónica Beatriz
INIQUI-CONICET, Facultad de Ingeniería (Universidad Nacional de Salta)
Avda. Bolivia 5150- 4400 Salta- Argentina
emilioalmazan8787@gmail.com; enzoocorte@gmail.com

RESUMEN

En la provincia de Salta, la población rural se ha expandido hacia lugares sin acceso al agua segura para consumir, lo que ha resultado en un aumento de enfermedades relacionadas con el consumo de agua contaminada. Para abordar este problema, se diseñó un sistema modular para obtener agua segura utilizando un proceso de clarificación con productos naturales y una desinfección mediante un proceso de separación con membranas, ultrafiltración. Se evaluaron diferentes alternativas de clarificantes naturales, incluyendo polvo de mucílago de penca de tuna (MT), polvo de pulpa de banana (PB) y polvo de residuos de papa (RP). El MT resultó ser el más eficiente en la remoción de turbidez, logrando una remoción del 96%, mientras que la PB y el RP obtuvieron 85% y 82% respectivamente. Se valoraron económicamente diferentes opciones para la obtención del MT, incluyendo tercerizar el secado y la molienda del mucílago o realizarlo de manera propia, así como cultivar la materia prima o comprarla. Resultó más rentable tercerizar el secado y la molienda del mucílago y cultivar la materia prima. Se determinaron los costos unitarios de producción del equipo y se comparó el costo del litro de agua segura producido con otras alternativas, teniendo en cuenta los costos del clarificante natural, los costos diarios de limpieza del equipo y el recambio mensual de cartuchos de ultrafiltración. El precio del litro de agua segura obtenido con el sistema y usando el clarificante natural elegido fue de 0,10 USD/L, resultando competitivo en comparación a las diferentes alternativas existentes en el mercado.

Palabras Claves: Agua segura, clarificantes naturales, ultrafiltración.

ABSTRACT

In the province of Salta, the rural population has expanded to places without access to safe water for consumption, resulting in an increase in diseases related to the consumption of contaminated water. To address this problem, a modular system was designed to obtain safe water using a clarification process with natural clarifiers and disinfection through ultrafiltration. Different alternatives of natural clarifiers were evaluated, including powder of prickly pear cactus mucilage (MT), banana pulp powder (PB) and potato residue powder (RP). MT proved to be the most efficient in removing turbidity, achieving a removal of 97%, while PB and RP obtained 85% and 82% respectively. Different options for obtaining MT were economically valued, including outsourcing the drying and grinding of the mucilage or doing it on their own, as well as cultivating the raw material or buying it. It was more profitable to outsource the drying and grinding of the mucilage and cultivate the raw material. The unit costs of production of the equipment were determined and the cost of the liter of safe water produced was compared with other alternatives, taking into account the costs of the natural clarifier, the daily cleaning costs of the equipment and the monthly replacement of ultrafiltration cartridges. The price of the liter of safe water obtained with the system and using the chosen natural clarifier was 0.10 USD/L, proving competitive compared to different alternatives in the market.

Keywords: Safe water, natural clarifiers, ultrafiltration.

1. INTRODUCCIÓN

El agua, el elemento esencial de la vida, es un recurso invaluable para la salud y el bienestar humano. La disponibilidad de agua segura es un pilar fundamental para una vida saludable y digna. Lamentablemente, la carencia de acceso a agua potable y saneamiento adecuados es una causa principal de enfermedades que afectan a millones de personas en todo el mundo. Enfermedades como el paludismo, el cólera, la disentería, la esquistosomiasis, la hepatitis infecciosa y la diarrea, vinculadas al agua y al saneamiento inadecuados, cobran anualmente la vida de 3,400 millones de personas (Prüss-Üstün et al., 2006). La producción de agua segura es, por lo tanto, una prioridad crítica para la sociedad global. La Organización Mundial de la Salud (2006) define el agua segura como aquella que, debido a su condición y tratamiento, no contiene gérmenes ni sustancias tóxicas que puedan poner en peligro la salud humana. Garantizar la calidad del agua destinada al consumo humano, doméstico y diversas aplicaciones es esencial para prevenir enfermedades y promover el bienestar.

Con respecto a la provincia de Salta, se enfrenta a un desafío significativo. El crecimiento acelerado de la población ha llevado a un aumento en la urbanización y la ocupación de áreas donde los servicios básicos de agua potable y saneamiento son limitados o inexistentes. Este escenario ha agravado los problemas de salud pública en la región. En particular, las comunidades rurales, que dependen en gran medida de fuentes de agua superficial y pozos poco profundos sin tratamiento, se encuentran en una situación alarmante (J. E. Almazán, 2017).

La ultrafiltración (UF) surge como una alternativa prometedora para purificar el agua, con ventajas notables sobre los métodos convencionales de desinfección. Sin embargo, surge una limitación crítica en entornos como Salta, donde las aguas superficiales a menudo son turbias, especialmente durante la temporada de verano, ya que la membrana de UF tiende a ensuciarse y dañarse rápidamente en estas condiciones, obligando a su limpieza o incluso reemplazo (J. E. Almazán, 2017). La clarificación previa a la UF es una etapa muy importante dentro del proceso de potabilización ya que permite la remoción del material coloidal en suspensión mediante el proceso conocido como coagulación-floculación, mejorando así el rendimiento de la membrana. A su vez, la presencia de microorganismos, pueden ocasionar el biofouling de la membrana por lo que esta etapa también podría disminuir este efecto. Para ayudar a este proceso se utilizan coagulantes-floculantes o clarificantes. Los agentes convencionales utilizados son sales metálicas tales como el sulfato de aluminio (el más usado a nivel mundial), el cloruro férrico y el sulfato ferroso (Silvan et al., 2012). Sin embargo, estudios demostraron la existencia de trazas de sulfato de aluminio en muestras de agua potabilizadas, lo que representa un riesgo potencial para la salud humana, debido a la relación entre el aluminio residual y efectos neurológicos adversos (Bratby, 2006). Frente a esta problemática se comenzaron a desarrollar numerosas investigaciones sobre una gran variedad de material vegetal que presentaron poder clarificante para el tratamiento de matrices acuosas turbias. Por lo general, son inocuos para la salud humana y, en muchos casos, son productos alimenticios con alto contenido de carbohidratos y de proteínas solubles en agua (Ang & Mohammad, 2020; Fabris et al., 2010). Por ejemplo, coagulantes a partir de Moringa oleífera, mucílago de penca de tuna (*Opuntia ficus*), porotos (*Phaseolus vulgaris*), y semillas de Nirmali (*Strychnos potatorum*) han sido investigados, obteniendo resultados promisorios.

Por lo expuesto anteriormente los objetivos de este trabajo fueron: (1) Investigar materiales vegetales prometedores como clarificantes y seleccionar los 3 más prometedores para la región de Salta; (2) comparar el desempeño de los clarificantes naturales removiendo turbidez; (3) evaluar la posibilidad de combinar el proceso de clarificación (usando el clarificante más prometedor) y desinfección (mediante UF) para producir agua segura a partir de una matriz acuosa turbia; y (4) determinar la alternativa más rentable para implementar este sistema, calculando los costos asociados a la producción de agua segura.

2. MATERIALES Y MÉTODOS

2.1. Selección de los clarificantes

Para llevar a cabo la selección de los clarificantes naturales más prometedores para la región, se llevó a cabo una meticulosa investigación que implicó varios pasos. El objetivo principal de este proceso era identificar aquellos clarificantes que fueran adecuados para el proyecto. A continuación, se detallan los pasos y métodos utilizados:

2.1.1 Recopilación de Información

Se realizó una exhaustiva búsqueda de productos vegetales utilizados como coagulantes en diferentes partes del mundo. Esta búsqueda se llevó a cabo consultando literatura especializada, incluyendo libros

y revistas científicas, así como la exploración de bases de datos internacionales en línea. La primera selección de los clarificantes se basó en criterios específicos, tales como:

- Relevancia Regional: Se prioriza la inclusión de productos vegetales que fueran relevantes y fácilmente disponibles en la región de Salta.
- Inocuidad para la Salud Humana: Se consideró fundamental que los clarificantes no representaran riesgos para la salud humana.
- Potencial Innovador: Se evaluó el potencial innovador de los materiales en el contexto de los clarificantes naturales.
- Procesos de Extracción Simples: Se dio preferencia a aquellos clarificantes cuya obtención no requiriera procesos complejos, con el objetivo de minimizar costos y facilitar su aplicación.

2.1.2 Método del Proceso Jerárquico Analítico (Analytic Hierarchy Process, AHP)

Para la comparación y selección de los clarificantes naturales, se aplicó el Método del Proceso Jerárquico Analítico (AHP). Este enfoque permite una evaluación efectiva y gráfica de proyectos, teniendo en cuenta múltiples criterios en la toma de decisiones. Se basa en la descomposición de un problema en niveles jerárquicos, lo que permite a los tomadores de decisiones estructurar el problema de manera visual a través de un modelo que consta de tres niveles: objetivo, criterios y alternativas (Corte et al., 2023).

Secuencia del Proceso AHP:

- Definición del Objetivo: El objetivo primordial fue clasificar a los distintos clarificantes naturales seleccionados y elegir a los mejores para el proyecto en cuestión.
- Identificación y Selección de Criterios: Se identificaron y seleccionaron criterios que fueran relevantes y que influyeron significativamente en el logro de los objetivos.
- Identificación de Alternativas: Se identificaron las diversas alternativas investigadas previamente, es decir, los clarificantes naturales seleccionados.
- El modelo de jerarquía resultante permitió visualizar el problema de decisión de manera clara y sencilla, lo que facilitó su análisis y evaluación utilizando la herramienta de software Expert Choice.

Este proceso sistemático de selección garantizó la elección informada de los clarificantes naturales más apropiados para el proyecto, teniendo en cuenta criterios técnicos, regionales y de salud pública, tanto cualitativos como cuantitativos, contribuyendo así a la producción de agua segura en la provincia de Salta.

Los criterios tenidos en cuenta para realizar el AHP fueron:

- Disponibilidad de los productos naturales en la región: Evalúa la accesibilidad de los materiales naturales en la región.
- Método de extracción: Considera la complejidad del proceso de obtención del clarificante.
- Efectividad en la remoción de turbidez para:
 - Alta turbidez: Mide la capacidad del clarificante para tratar aguas muy turbias.
 - Baja turbidez: Evalúa la eficacia en aguas con baja turbidez.
- Variación de pH: Estudia si el clarificante afecta significativamente el pH del agua.
- Efecto bactericida: Considera la capacidad de eliminar microorganismos patógenos.
- Tiempo de sedimentación: Mide el tiempo necesario para la clarificación.
- Dosis óptima requerida: Evalúa la cantidad necesaria de clarificante para lograr la clarificación.
- Inocuidad: Analiza la seguridad para la salud humana y el medio ambiente.

2.2. Evaluación experimental de los clarificantes más prometedores para la región

2.2.1 Método de evaluación

Para evaluar el desempeño en la remoción de turbidez de los tres clarificantes mejor calificados según el Método del Proceso Jerárquico Analítico (AHP) (cáscara de papa, mucílago de penca de tuna y pulpa de banana), se implementó el ensayo conocido como "Prueba de Jarra". Este ensayo se llevó a cabo utilizando un equipo Parsec Jar Test, que permite simular a escala de laboratorio el proceso de coagulación-floculación, lo que facilita la obtención de agua clarificada y la comparación de la calidad antes y después del tratamiento.

2.2.2 Preparación de las matrices acuosas

En el laboratorio se prepararon cuatro matrices acuosas en vasos de precipitados de un litro cada uno. Cada matriz se compuso de 500 ml de agua destilada a la cual se le añadieron sólidos para simular la turbidez. Los sólidos, recogidos de un río en Salta, se clasificaron por tamaño y se utilizaron solo partículas menores a 45 nm, representando así la peor situación de turbidez. Esto se debe a que partículas más pequeñas son más difíciles de eliminar y sedimentar, con una concentración de 5 g/l (J. E. Almazán, 2017).

2.2.3 Adición de clarificantes y proceso de sedimentación

De las cuatro matrices acuosas, a tres de ellas se les adicionó la dosis óptima de los clarificantes seleccionados: 0,05 g/l de polvo de cáscara de papa (Carrasquero et al., 2017), 0,5 g/l de polvo de pulpa de banana (Salinas et al., 2020) y 0,05 g/l de polvo de mucílago de penca de tuna (Almazán et al., 2018).

La preparación de estos productos para potenciar las propiedades clarificantes de los mismos fue diversa:

- Para obtener el polvo de cáscara de papa, se recolectaron cáscaras de diversas sandwicherías en la ciudad de Salta, que eran residuos de las mismas. Estas cáscaras se lavaron, secaron a 100 °C durante 24 horas y luego se trituraron para obtener el polvo (Figura 1) (Corte et al., 2023).



Figura 1 polvo de cáscara de papa seca. Fuente: Elaboración propia

- En el caso del polvo de pulpa de banana, se adquirieron bananas en estado verde, ya que en este estado contienen una mayor cantidad de almidón. Se separó la pulpa de la cáscara y se cortó en rebanadas finas para facilitar el secado. Posteriormente, las rebanadas se deshidrataron en una estufa de laboratorio a 38,5 °C durante 8 horas y se trituraron para obtener un polvo fino y homogéneo (Figura 2) (Salinas et al., s. f.).



Figura 2 Polvo de almidón de banana obtenido por método seco. Fuente: Elías Salinas

- El mucílago de penca de tuna se recolectó en la localidad de Vaqueros, y se cortó en finas tiras de 1 cm de ancho, las cuales fueron colocadas en estufa a 60°C durante 24 h (Figura 3a). A continuación, se molieron con un mortero hasta obtener un polvo (Figura 3b).

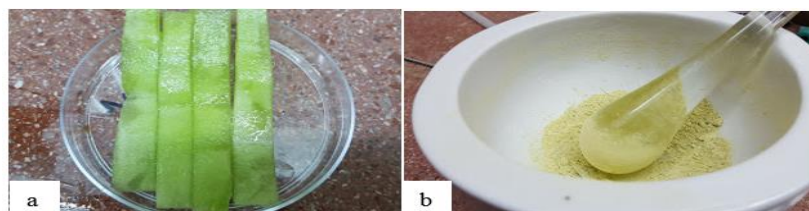


Figura 3 Obtención del polvo de mucílago a) tiras cortadas del mucílago de penca de tuna. b) polvo de mucílago de penca de tuna. Fuente: (Almazán et al., 2018).

Se aplicó el mismo esquema de mezclado para todos los ensayos de sedimentación (J. E. Almazán, 2017). Inicialmente, se agitó a 160 rpm durante dos minutos para garantizar la homogeneización del floculante. Posteriormente, se realizó un mezclado lento a 15 rpm durante 15 minutos para favorecer el crecimiento de los flóculos.

Antes de agregar el clarificante natural a cada matriz acuosa turbia, se midió la turbidez en Unidades Nefelométricas Totales (UNT) utilizando un medidor multiparamétrico Horiba. Después de completar el proceso de sedimentación, se determinó la turbidez final en cada matriz. Con estos datos se determinó la remoción de turbidez (RT, en porcentaje, ecuación (1)):

$$RT (\%) = 100 \times (\text{Turb}_i - \text{Turb}_f) / \text{Turb}_i \quad (1)$$

2.3. Obtención de Agua Segura mediante el proceso de sedimentación-ultrafiltración.

Luego de la comparación experimental de los clarificantes en la etapa previa, se determinó que el mucílago de penca de tuna demostró la mayor eficiencia en la remoción de turbidez. En consecuencia, este clarificante se eligió para avanzar en la evaluación del proceso de obtención de agua segura.

2.3.1 Evaluación del proceso

La evaluación del proceso de obtención de agua segura se dividió en dos etapas fundamentales: la sedimentación (utilizando únicamente el clarificante natural) y la ultrafiltración (UF). Además, se introdujo un componente de evaluación microbiológica para determinar la eficiencia en la eliminación de microorganismos patógenos.

2.3.2 Preparación del stock bacteriano

Para evaluar la eficiencia de la UF, se sembraron en las matrices acuosas, concentraciones conocidas de tres bacterias: *Escherichia coli*, enterococos (ambientales) y *Pseudomonas aeruginosa* (De colección, ATCC 27853). La preparación del stock bacteriano consistió en sembrar cada cepa en dos tubos de 5 ml de caldo nutritivo cada uno. Se incubó en estufa durante 18 h a 37 °C. Pasado este tiempo se mezclaron y fraccionaron ambos tubos de caldo en ocho tubos de microcentrífuga, los que se centrifugaron a 4.000xg durante 10 minutos. Luego se descartó el sobrenadante y se procedió a la resuspensión del pellet de células con 0,5 ml de buffer fosfato salino (PBS) 1x. Este paso se repitió para asegurarse de eliminar cualquier residuo de caldo nutritivo y garantizar que las bacterias no continuarán su crecimiento. El stock (determinado mediante recuento en placa) es el que se utilizó para sembrar en las respectivas matrices acuosas para el ensayo de sedimentación el cual consistió en: 2,8 10¹⁰ UFC/ml de *Escherichia coli*, 1 10⁹ UFC/ml de enterococos y 3 10¹⁰ UFC/ml de *Pseudomonas aeruginosa*.

2.3.3 Ensayo de sedimentación

El ensayo de sedimentación se llevó a cabo en un tanque plástico con un fondo cónico de 30 litros de capacidad, que simuló a un equipo sedimentador. Este tanque se colocó antes del equipo de UF (Figura 4).

La matriz acuosa a clarificar y filtrar se preparó con 20 l de agua de red a la cual se le agregó 100 g (concentración de sólidos: 5 g/l) de una de las fracciones más pequeñas de sólidos (de 74- 44 µm) para evaluar una situación de turbidez crítica.

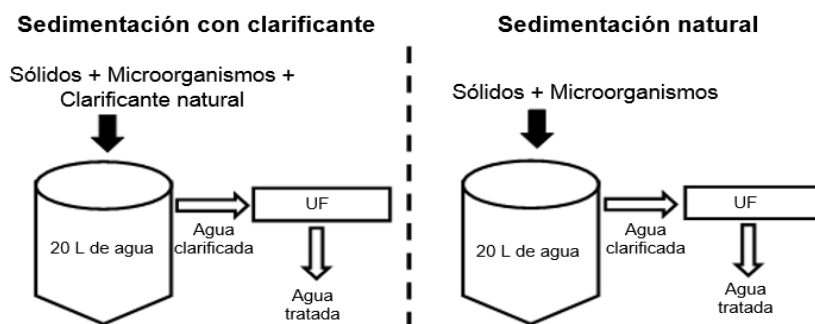


Figura 4 Esquema de los ensayos realizados para la obtención de agua segura. UF es ultrafiltración.
Fuente: (J. E. Almazán, 2017)

A la matriz acuosa turbia se le agregó un volumen determinado del stock de cada una de las tres bacterias para alcanzar una concentración final aproximada de 105 UFC/ml: 75 µl de *Escherichia coli*, 2 ml de enterococos y 70 µl de *Pseudomonas aeruginosa*. Posteriormente se le adicionó al tanque sedimentador 20 g de mucílago de penca de tuna (concentración final: 1 g/l) como clarificante natural.

El ensayo se repitió sin la adición de clarificante natural para establecer una situación de sedimentación natural con fines comparativos (Fig. 4). En ambos ensayos, con y sin clarificante natural, se agitó

durante 3 minutos y se permitió un período de reposo de 15 minutos. Se midieron pH, conductividad y turbidez al inicio y al final de la sedimentación, utilizando una sonda multiparamétrica U10 HORIBA.

2.3.4 Ensayo de ultrafiltración

A continuación, se filtraron las matrices acuosas clarificadas para estudiar la eficiencia del módulo de UF para la eliminación de los microorganismos y se evaluó si en algún momento durante el proceso de ultrafiltración la membrana sufría alguna rotura (vida útil) que ocasionara la aparición en el permeado de microorganismos y/o sólidos. Para poder saber si el uso del mucílago de penca de tuna como clarificante tenía algún efecto en la disminución del ensuciamiento de la de UF, se midió el flujo permeado a lo largo de toda la experiencia.

El equipo de UF consistió en un tanque de alimentación de acero inoxidable, una bomba peristáltica, un módulo de UF descartable (Marca GAMBRO modelo 24R de poliamida) y mangueras para separar el flujo permeado del flujo retenido (Figura 5) (Poma et al., 2012). El agua del tanque de alimentación se impulsó por medio de la bomba a través del módulo de UF, obteniéndose dos corrientes, la de permeado libre de microorganismos y partículas sólidas y la de retenido, que se recirculó al tanque de alimentación. El proceso continuó hasta alcanzar el menor volumen posible de retenido.

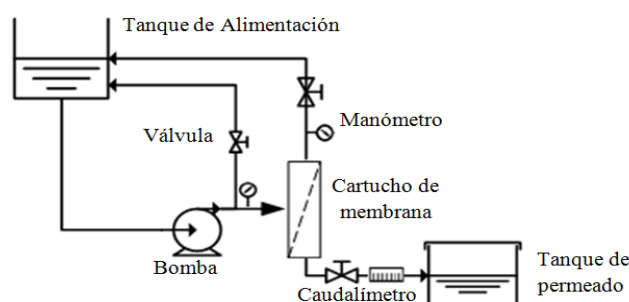


Figura 5 Equipo de ultrafiltración utilizado. Fuente: (J. E. Almazán, 2017)

Antes de comenzar el proceso de UF, se tomó una muestra inicial (100 ml) del tanque de alimentación y luego se tomaron cada veinte minutos muestras (400 ml) del permeado en vasos estériles para realizar el recuento bacteriano.

La cuantificación de las bacterias se realizó por el método de filtración por membrana (Eaton et al., 2005): *Escherichia coli* en Agar mTEC modificado (Fluka, USA) a 44,5 °C durante 24 h (Método 1603; EPA 2002a) (EPA, 2002b), enterococos en Agar mE (Difco, USA) a 41 °C por 48 h y confirmación en Agar Esculina-Hierro (EIA) a 41 °C por 20 min (Método 1106.1; EPA 2002b)(EPA, 2002) y *Pseudomonas aeruginosa* usando Agar Cetrimide (Britania, Argentina), incubando a 37 °C por 24 h (Método W6-NHS-UK; HPA 2007).

2.4 Opción más rentable para obtener penca de tuna: Análisis

La adquisición de la penca de tuna es un aspecto crítico en la viabilidad y sostenibilidad para la obtención de agua segura. En este sentido, se llevaron a cabo análisis para determinar la opción más rentable y efectiva. Aquí se presenta una descripción de las tres posibilidades consideradas: compra a comerciantes, producción propia y recolección de tuna silvestre.

2.4.1 Compra de penca de tuna a productores y comerciantes

Esta opción consistió en la evaluación de la viabilidad de adquirir la penca de tuna a productores y comerciantes especializados en este recurso esencial. Para llevar a cabo esta evaluación, se consultó con expertos en la localización de productores de tuna, como la Dra. Patricia Ortín de la Facultad de Ciencias Naturales de la Universidad Nacional de Salta, y se mantuvieron conversaciones con comerciantes de tuna.

Se obtuvo información relevante sobre variedades de tuna, contenido de humedad en la penca, edad adecuada de las tunas y precios de mercado. Los resultados demostraron que era viable adquirir la penca de tuna a precios competitivos, con disponibilidad garantizada y ubicación conveniente. Se propuso la estrategia de comprar la materia prima a un proveedor en el norte de Córdoba y realizar el secado y la molienda en el lugar de origen. Esta estrategia redujo significativamente los costos de transporte y minimizó las pérdidas debido a daños durante el traslado, considerando la susceptibilidad de la penca de tuna a la pudrición y otros deterioros relacionados con el transporte.

2.4.2 Cultivo y producción propia de tuna

En esta alternativa, se llevó a cabo un análisis de la factibilidad técnica y económica de establecer un cultivo de tuna con el objetivo de asegurar el suministro de materia prima.

Se examinaron aspectos como la inversión inicial requerida, los costos de mantenimiento del cultivo (se estimó en un 15% del costo de la fruta), el tiempo estimado para obtener una cantidad suficiente de penca de tuna para el proyecto y la posibilidad de tercerizar la etapa de secado y molienda, entre otros (Castro Marcelo et al., 2009; Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura & el Centro Internacional de Investigaciones Agrícolas en Zonas Áridas Roma, 2018).

Para efectuar una comparación entre la realización interna de la etapa de secado y molienda en la planta o la tercerización de estas actividades, es imprescindible comprender el proceso de producción y los equipos necesarios.

El proceso de producción del clarificante natural se compone de cinco etapas clave:

1. Selección: Involucra la recepción de la materia prima, su revisión y la selección de las pencas adecuadas.
2. Lavado y limpieza: Las pencas se sumergen en un tanque de acero inoxidable con agua pura y desinfectante para eliminar residuos como tierra, polvo e insectos.
3. Rebanado y preparación: Se cortan las pencas en tiras sin retirar la piel, y luego se disponen en bandejas.
4. Secado y reposo: El secado se realiza en bandejas mediante un horno eléctrico o a gas a una temperatura de 60°C durante 21 horas, seguido de un período de reposo de 30 a 60 minutos para el enfriamiento.
5. Molienda: Las pencas deshidratadas se muelen para obtener un fino polvo de alrededor de 300 mm.

Además, se deben tener en cuenta los costos asociados a la construcción de un galpón o espacio adecuado para la planta, donde se considera que un área mínima de 80 m² es suficiente. Asimismo, en la evaluación de costos se incluyen los salarios anuales de dos operarios designados para esta área y los costos variables de electricidad y agua. Por otro lado, en caso de optar por la tercerización, no sería necesario adquirir ni el horno secador ni el molino. Además, los costos variables derivados del consumo de electricidad serían inferiores. La tercerización de estas etapas se llevaría a cabo con productores locales de Guachipas, cuyo costo asciende a 72,000 dólares por tonelada de producto seco obtenido (Cervantes Schamun, 2020).

2.4.3 Recolección de tuna silvestres

La tercera opción contemplada fue la recolección de tuna silvestre. Para esta alternativa, se recopiló información sobre la disponibilidad y ubicación de zonas con tuna silvestre en la provincia de Santiago del Estero. El análisis se basó en la accesibilidad y proximidad a la provincia de Salta, priorizando sectores donde la penca de tuna pudiera recolectarse con facilidad y a poca distancia de la Ruta 9, en dirección sudeste desde la localidad de Termas de Río Hondo.

2.5 Comparación de alternativas y costos de producción

Para la comparación de las diversas alternativas, se consideraron elementos claves en el cálculo de costos, de acuerdo a la demanda proyectada. Se destacan los siguientes aspectos:

- Cantidad óptima de clarificante natural: Se tomó como referencia la cantidad óptima de 0.05 gramos de clarificante natural por litro de agua.
- Contenido de humedad de la penca de tuna fresca: Se reconoció que la penca de tuna fresca contiene aproximadamente un 93% de humedad, reduciéndose al 4% tras el proceso de deshidratación, con una pérdida adicional del 10% en la etapa de limpieza, según informes de la Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura y el Centro Internacional de Investigaciones Agrícolas en Zonas Áridas Roma (2018).
- Costos unitarios de equipos e insumos: Se llevaron a cabo cálculos exhaustivos de los costos unitarios de los equipos diseñados para producir agua segura, incluyendo tanto el clarificante natural como el proceso de ultrafiltración. Asimismo, se tuvieron en cuenta los costos de los insumos, tales como válvulas, bomba centrífuga, mangueras, manómetros, cartuchos de ultrafiltración, estructura metálica y accesorios varios, con una expectativa de vida útil de 10 años. La producción diaria por equipo se estimó en 200 litros.

- Costos de limpieza y desinfectantes: Se realizó una evaluación detallada de los costos asociados a la limpieza integral del sistema de producción y los desinfectantes necesarios para garantizar la calidad del agua segura.
- Costos de electricidad: Se consideraron las tarifas estándar de facturación de Energía Eléctrica proporcionadas por EDESA (Empresa Distribuidora de Electricidad de Salta), teniendo en cuenta la potencia requerida para el funcionamiento eficiente de la bomba en el sistema.
- Flujos de caja económicos: Se realizó un análisis de los flujos de caja económicos, considerando una demanda en constante crecimiento para el proyecto. Dado su carácter social, se incorporaron los ahorros resultantes de la reducción de gastos en salud pública, basados en el 40% de los casos tratados por diarrea en niños menores de 5 años en Salta Capital durante el año 2018, con un promedio anual de 267,896 dólares.
- Evaluación de rentabilidad: Se calcularon indicadores económicos clave, tales como el Valor Actual Neto (VAN), la Tasa Interna de Retorno (TIR) y el período de recuperación de la inversión, con el propósito de evaluar la viabilidad económica del proceso.
- Cálculo del costo del litro de agua segura: Con todos los datos procesados, teniendo en cuenta la alternativa más rentable y viable para obtener el clarificante natural, se obtuvo el costo por litro de agua segura producido por el equipo propuesto, lo que permitió su comparación con otras alternativas de suministro de agua.

3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

3.1. Selección de los clarificantes

La selección de clarificantes naturales fue un proceso crítico para garantizar la eficacia del tratamiento de agua en la región. Para evaluar y comparar los clarificantes disponibles, se aplicó el Método del Proceso Jerárquico Analítico (AHP), que permitió una toma de decisiones fundamentada.

Los resultados de este proceso, asistido por el software Expert Choice, se presentan en la figura adjunta, junto con los criterios seleccionados y las alternativas (Figura 6). Destacan los residuos de papa (cáscara de papa) como materia prima líder destacándose principalmente por su disponibilidad en la región como así también en los costos y método de extracción, al tratarse de un residuo de la industria alimenticia, junto con el mucílago de penca de tuna, destacándose por su efectividad principalmente y la pulpa de banana. Además, se aprecia la ponderación de los criterios seleccionados, basada en comparaciones pareadas. Estos resultados orientaron las próximas fases de investigación para la producción segura de agua en la región.

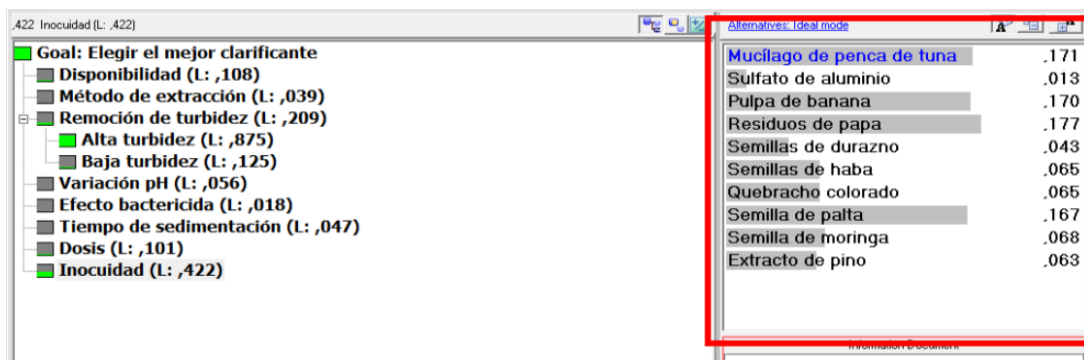


Figura 6 Captura de pantalla del software Expert Choice, donde se ve la ponderación de los criterios seleccionados y la calificación de los clarificantes evaluados. Fuente: Elaboración propia.

3.2. Evaluación experimental de los clarificantes más prometedores para la región

Se procedió a la evaluación experimental de los tres clarificantes mejor calificados según la metodología empleada anteriormente: polvo de cáscara de papa seca, polvo de pulpa de banana y polvo de mucílago de penca de tuna. Se comparó la eficacia de estos clarificantes en la remoción de sólidos en suspensión.

Los resultados revelaron diferencias significativas en la efectividad de los clarificantes (Figura 7). El polvo de mucílago de penca de tuna demostró una eficacia excepcional al lograr una remoción de sólidos del 96%. Aunque tanto el polvo de cáscara de papa seca como el polvo de pulpa de banana mostraron menor eficiencia en la remoción de turbidez con resultados con un 82% y un 85% de remoción respectivamente, queda claro que utilizar cualquiera de estos clarificantes es preferible a no

usar ninguno. El control, que consistía en una matriz acuosa sin clarificante, alcanzó solo una remoción del 73%.

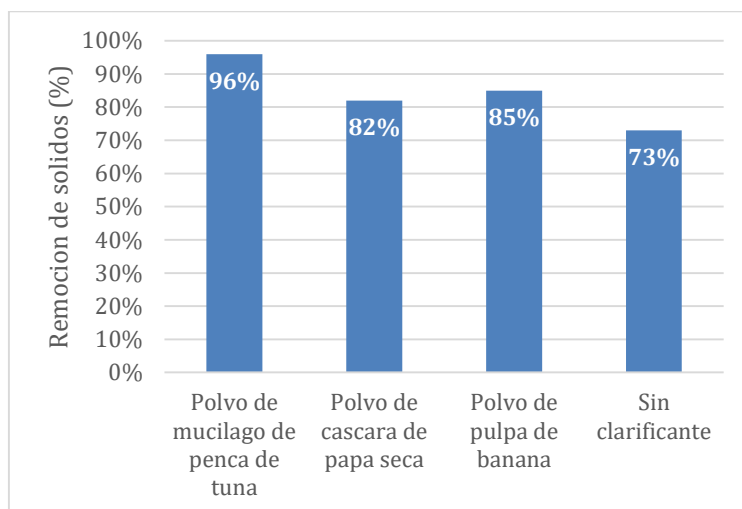


Figura 7 Comparación de alternativas de clarificantes en matrices acuosas con 5 g/l de sólidos. Fuente: Elaboración propia

Estos resultados, en particular la destacada eficacia del polvo de mucilago de penca de tuna, comparable con clarificantes comerciales, respaldaron la decisión de avanzar con este producto natural en las investigaciones posteriores. Es importante mencionar que la eficacia del polvo de pulpa de banana está en línea con investigaciones previas, aunque el polvo de cáscara de papa seca mostró un rendimiento diferente al observado en el trabajo (Carrasquero et al., 2017) donde se informó una eficacia de remoción de turbidez del 97%.

3.3 Obtención de Agua Segura

3.3.1 Efecto de la clarificación en las matrices acuosas.

Durante el ensayo de clarificación previo a la ultrafiltración (UF), se observaron diferencias notables en la turbidez inicial y final cuando se empleó el mucilago de penca de tuna (Tabla 1), logrando una remoción del 97% de la turbidez. En contraste, para la matriz sin clarificante, la remoción alcanzó solo el 65%. Es importante destacar que el pH, la temperatura y la conductividad no experimentaron cambios significativos antes y después de la sedimentación (Tabla 1).

Tabla 1 Variables fisicoquímicas medidas al Inicio y al Final de la etapa de sedimentación para la matriz acuosa, con y sin clarificante para ambos ensayos.

Variables	Con clarificante		Sin clarificante	
	Inicial	Final	Inicial	Final
pH	8,1	7,8	8,7	9,1
Turbidez (NTU)	459	14	387	130
Temperatura (°C)	11,6	12,0	16,0	16,0
Conductividad (mS/cm)	0,25	0,25	0,22	0,24

3.3.2 Ultrafiltración

En el proceso de UF, se logró una eficiencia del 100% en la remoción de las tres bacterias evaluadas en ambos casos estudiados (con o sin floculante natural). Ninguna bacteria fue detectada en el permeado, manteniendo esta remoción total de microorganismos constante a lo largo de la UF. Sin embargo, al analizar el flujo permeado, se observaron diferencias notables entre los dos casos (Figura 8). Cuando se alimentó la unidad de UF con agua clarificada mediante la sedimentación con la adición de mucilago de penca de tuna, se logró un flujo permeado de 2,14 L/m²h en el estado

pseudoestacionario. En contraste, cuando se utilizó agua clarificada mediante sedimentación natural, el flujo permeado alcanzó 1,46 L/m²h en estado pseudoestacionario. Esto sugiere que, en el primer caso, ingresó a la unidad de UF una carga menor de sólidos disueltos en el agua debido a la sedimentación realizada con el clarificante natural, lo que resultó en un menor ensuciamiento de la membrana en comparación con el agua que ingresó a la UF sin la adición de mucílago de penca de tuna (sedimentación natural). Además, se observó que el flujo permeado obtenido a partir de la matriz acuosa tratada con mucílago de penca de tuna fue más estable y alcanzó el estado pseudoestacionario más rápidamente (Figura 8).

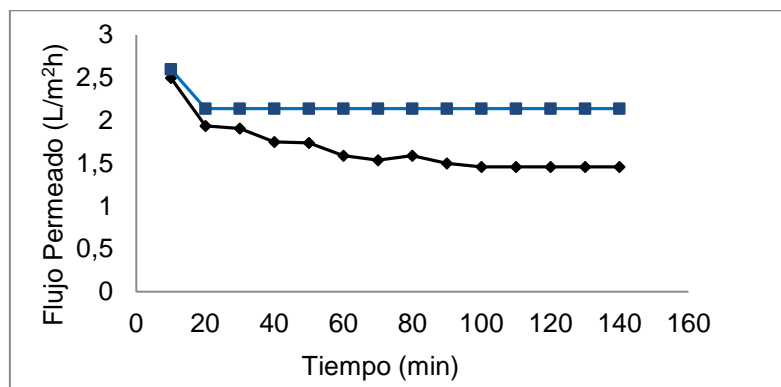


Figura 8 Caída de flujo permeado en la ultrafiltración. Los datos azules representan el flujo permeado con agregado de mucílago de penca de tuna en la etapa de sedimentación y los negros sin tratamiento con mucílago de penca de tuna (sedimentación natural).

3.4 Opción Más Rentable para Obtener Penca de Tuna: Comparación de Alternativas y Costos de Producción

De las distintas formas de adquisición de materia prima, se descarta la recolección de penca de tuna silvestre. Se justifica la exclusión de la recolección de penca de tuna silvestre debido a la propiedad pública, impacto ambiental, logística desafiante y variabilidad en las condiciones de crecimiento, que afectarían la eficiencia del clarificante (Ang & Mohammad, 2020).

3.4.1 Compra de la penca de tuna a productores o comerciantes

La siguiente tabla (Tabla 2) desglosa los costos por tonelada de clarificante en polvo, considerando la materia prima (penca de tuna), el secado y molienda, y el flete, con un costo total de \$112,410 por tonelada.

Tabla 2 Costo por tonelada de clarificante

	Precio unitario (\$/t)	Cantidad (t)	Monto (\$)
Penca de tuna	2.500	15,24	38.100
Secado y molienda	72.000	1	72.000
Flete	2.310	1	2.310
TOTAL	-	-	112.410

3.4.2 Cultivo y producción propia de tuna

Los resultados del análisis comparativo entre los dos enfoques, realizar el secado y molienda para la obtención del clarificante natural a partir de la penca de tuna fresca de forma propia, y tercerizar la tarea con productores de Guachipas, son los siguientes:

Realizar secado y molienda de penca de tuna:

- Tasa de corte: 17%
- VAN: \$ -16.412.120

Tercerizar secado y molienda de penca de tuna:

- Tasa de corte: 17%
- VAN: \$ -4.224.348

La tercerización del proceso de secado y molienda resulta ser la opción más rentable desde una perspectiva económica, demostrada por el VAN y la tasa de corte (TIR), ya que conlleva un menor gasto que realizarlo internamente.

3.4.3 Comparación de Alternativas y Costos de Producción

Asimismo, teniendo en cuenta el resultado anterior, se realizó una comparación adicional entre el cultivo propio de tuna, tercerizando el secado y molienda, y la compra de la penca de tuna a comerciantes. Considerando un cultivo de 6 hectáreas, con un rendimiento estimado de 105 toneladas por hectárea por año, se obtuvieron los siguientes resultados:

Cultivo de tuna y tercerizar:

- Tasa de corte: 17%
- VAN: \$ -5.733.862

Compra de la materia prima y tercerizar:

- Tasa de corte: 17%
- VAN: \$ -6.595.264

Los análisis económicos respaldan que la estrategia más eficiente y conveniente implica el cultivo local de la tuna, seguido de la tercerización de la fase de secado y molienda con productores locales. El costo del clarificante natural cultivado localmente y tercerizado fue de 0,013 USD/100 L de agua clarificada, lo cual es competitivo en comparación con los clarificantes tradicionales. El costo unitario estimado del equipo diseñado es de 726 USD, con una vida útil de 10 años. El precio estimado del litro de agua producido con este sistema fue de 0,098 USD/L, más económico que la opción de agua embotellada.

Cabe destacar que esta propuesta no pudo ser evaluada como un proyecto de inversión económico netamente, debido a que tiene involucrado un factor social relacionado con el mejoramiento de la calidad de vida de las personas. Por esta razón se tomó como inversión el gasto de salud pública evitado que es aquel que se obtendría si las familias de Salta Capital y alrededores tuvieran acceso a agua segura. Con la inversión se podría construir en el primer año del proyecto 300 equipos de obtención de agua potable, y con la recuperación de la inversión y en el año 5, 300 equipos más. Estos equipos serían distribuidos en viviendas y escuelas rurales.

4. Conclusiones finales

Este trabajo representa un paso significativo en la industrialización de un sistema de producción de agua no convencional. A diferencia de investigaciones anteriores, que se llevaron a cabo en escala de laboratorio (Ang & Mohammad, 2020), este estudio marca un punto de partida crucial para demostrar la viabilidad técnica y económica a escala industrial.

Esta investigación se centró en la provincia de Salta, donde la creciente población rural ha enfrentado la cruda realidad de la falta de acceso a agua segura, desencadenando una alarmante incidencia de enfermedades relacionadas con el consumo de agua contaminada.

Uno de los hitos destacados de esta investigación fue la evaluación y clasificación de diversos clarificantes naturales, incluyendo estudios experimentales con el polvo de mucílago de penca de tuna (MT), el polvo de pulpa de banana (PB) y el polvo de residuos de papa (RP). La evaluación reveló que el MT superó significativamente a sus contrapartes en términos de eficacia, logrando una remoción del 97% de la turbidez del agua. Esta selección estratégica fue el primer paso hacia la optimización del sistema.

Con un enfoque económico, se valoraron múltiples opciones para la obtención del MT, incluyendo la tercerización del secado y la molienda del mucílago o la producción interna, así como el cultivo propio de la materia prima o la adquisición. Los resultados arrojaron que la tercerización del proceso de secado y molienda, junto con el cultivo local de la materia prima, representa la estrategia más rentable.

A través de un análisis financiero siguiendo la estrategia seleccionada, se estableció que el precio del litro de agua segura obtenido con este sistema, utilizando el clarificante natural seleccionado, es de tan solo 0,10 dólares. Este costo competitivo sitúa esta solución en una posición ventajosa en comparación con las alternativas convencionales y abre un camino promisorio hacia la democratización del acceso al agua potable de calidad.

5. BIBLIOGRAFÍA

- Almazán, J. E., Domínguez, R. M., Gutierrez, D., Romero, E. M., & Rajal, V. B. (2018). Diferentes maneras de uso de un clarificante natural en procesos de potabilización de aguas turbias. *Revista de la Facultad de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales*, 5(2), 33-37.
- Ang, W. L., & Mohammad, A. W. (2020). State of the art and sustainability of natural coagulants in water and wastewater treatment. *Journal of Cleaner Production*, 262, 121267. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2020.121267>
- Bratby, J. (2006). *Coagulation and Flocculation in Water and Wastewater Treatment - Second Edition*.
- Carrasquero, S. J., Montiel Flores, S., Faría Perche, E. D., Parra Ferrer, P. M., Marin Leal, J. C., & Díaz Montiel, A. R. (2017). Efectividad de coagulantes obtenidos de residuos de papa (*Solanum tuberosum*) y plátano (*Musa paradisiaca*) en la clarificación de aguas. *Revista Facultad de Ciencias Básicas*, 13(2), 90-99. <https://doi.org/10.18359/rfcb.1941>
- Castro Marcelo, J. J., Paredes Rodríguez, C., Muñóz Alva, D. (2009). MANUAL TECNICO DE TUNA. GERENCIA REGIONAL AGRARIA LA LIBERTAD.
- Cervantes Schamun, & Miguel; Josué Goyret Solá, F. (2020). *Módulos de producción de agua segura usando clarificante natural y ultrafiltración*. Universidad Nacional de Salta.
- Corte, E. M., Rodríguez, D. J. A., & Almazán, J. E. (2023). IMPLEMENTACIÓN DE UN CLARIFICANTE NATURAL PARA EL TRATAMIENTO DE AGUAS TURBIAS.
- Eaton, A. D., Clesceri, L. S., Rice, E. W., & Greenberg, A. E. (2005). *Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater* (21.ª ed.). APHA, American Public Health Association.
- EPA. (2002). *Method 1106.1: Enterococci in Water by Membrane Filtration Using membrane-Enterococcus-Esculin Iron Agar (mE-EIA)*.
- Fabris, R., Chow, C., & Drikas, M. (2010). Evaluation of chitosan as a natural coagulant for drinking water treatment. *Water science and technology : a journal of the International Association on Water Pollution Research*, 61, 2119-2128. <https://doi.org/10.2166/wst.2010.833>
- J. E. Almazán, D. Gutiérrez Cacciabue, E. M. Romero Dondiz, S. E. Salas Agüero, & V. B. Rajal. (2017). Procesos no convencionales para la obtención de agua segura. *CAIQ*.
- La Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura, y el Centro Internacional de Investigaciones Agrícolas en Zonas Áridas Roma. (2018). *ECOLOGÍA DEL CULTIVO, MANEJO Y USOS DEL NOPAL*.
- Poma, H. R., Gutiérrez Cacciabue D., Garcé B, Gonzo, E. E., Rajal, V. B. (2012). Towards a rational strategy for monitoring of microbiological quality of ambient waters. En 2012. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2012.06.019>
- Prüss-Üstün, A., Corvalán, C. F., & Organization, W. H. (2006). *Ambientes saludables y prevención de enfermedades : hacia una estimación de la carga de morbilidad atribuible al medio ambiente: resumen de orientación / A. Prüss-Üstün, C. Corvalán*. Organización Mundial de la Salud. <https://apps.who.int/iris/handle/10665/43452>
- Salinas, E. G., Gutiérrez Cacciabue, D., & Almazán, J. E. (2020). *Evaluación de la pulpa de banana como clarificante natural de aguas turbias*.
- SILVAN, R., Canepa, J., & Hernandez-Barajas, R. (2012). Mezclas con potencial coagulante para clarificar aguas superficiales. *Revista internacional de contaminación ambiental*, 28, 229-236.