











ARTÍCULO ORIGINAL

Tratamiento de aguas residuales de curtiduría con plantas cactáceas

Tannery wastewater treatment with cactaceae plants

Juan Carlos Mariños Legendre ^{2a*}, Bertha Beatriz Anhuaman Namoc ^{2b}, Fiorella Carolina Morillo Méndez ^{1c}, Juan Carlos Cabrera La Rosa ^{3d}, Maricielo Campos Gutiérrez ^{2e}, Ana Isabel Huamán Jiménez ^{2f}, Pedro Pablo Lujan Castillo ^{1g}, Miguel Elías Pinglo Bazán ^{2h}, Gina Lilibeth Jaeger Lozano ²ⁱ, José Alonso Peláez Quevedo ^{2j}

¹ Curtiduría Sarco S.A.C, Trujillo, Perú

² Instituto Tecnológico de la Producción, Trujillo, Perú

³ Universidad Privada Antenor Orrego, Trujillo, Perú

^a jmarinos@itp.gob.pe, ^b banhuaman@itp.gob.pe, ^c fiorella29mm@gmail.com, ^d jcabrera@upao.edu.pe,

^e mcampos@itp.gob.pe, ^f ahuaman@itp.gob.pe, ^g curtiduriasarco1@hotmail.com, ^h mpinglo@itp.gob.pe,

ⁱ gjaeger@itp.gob.pe, ^j jpelaez@itp.gob.pe

* Autor de correspondencia

| Recibido: 09/11/22 |

| Arbitrado por pares |

| Aceptado: 07/6/23 |

Resumen

La industria de curtición y adobo de pieles mantiene su representatividad como actividad productiva regional, no obstante, su problemática persistente se dirige hacia el análisis y efectividad en el tratamiento de sus efluentes. Bajo esta condición, las empresas de la industria trabajan continuamente en la búsqueda de implementación de acciones correctivas que permitan dar cumplimiento al DS-010-2019-VIVIENDA, regulado por los organismos correspondientes. Bajo ese objetivo, se ha analizado el uso de plantas cactáceas como coagulante natural de la fase de remoción. La metodología aplicada está dividida en cuatro (04) tiempos, el primero, el proceso de obtención del floculante a partir de las plantas cactáceas, el segundo, análisis físico químico, tercero, análisis por espectrofotometría y finalmente, cuarto, determinación de variables de operación. De los

ensayos realizados, se logró obtener una remoción mayor a 70%, obteniendo que el floculante de mayor porcentaje de remoción es el obtenido a partir del cactus San Pedro con hasta 99%, la cual corresponde a la mezcla de procesos de 300 purga, 300 sal y 200 cromo; todo ello bajo las condiciones de operación establecidas y validadas, permitiendo así el cumplimiento de los valores máximos admisibles del DS 010-2019-VIVIENDA.

Palabras claves: Tratamiento de efluentes; *Echinopsis pachanoi*; remoción; San Pedro; biofloculante; sulfato de aluminio.

Abstract

The leather tanning and dressing industry maintains its representativeness as a regional productive activity, however, its persistent problem is directed towards the analysis and effectiveness in the treatment of its effluents. Under this condition, the companies in the industry work continuously in the search for the implementation of corrective actions that allow them to comply with DS-010-2019-VIVIENDA, regulated by the corresponding organisms. Under this objective, the use of cacti plants as a natural coagulant in the removal phase has been analyzed. The applied methodology is divided into four (04) times, the first, the process of obtaining the flocculant from the cacti plants, the second, physical chemical analysis, third, spectrophotometric analysis, and finally, fourth, determination of operation variables. From the tests carried out, it was possible to obtain a removal greater than 70%, obtaining that the flocculant with the highest percentage of removal is the one obtained from the San Pedro cactus with up to 99%, which corresponds to the mixture of processes of 300 purge, 300 salt and 200 chrome; all this under the established and validated operating conditions, thus allowing compliance with the maximum admissible values of DS 010-2019-VIVIENDA.

Keywords: Effluent treatment; *Echinopsis pachanoi*; removal; San Pedro; bio flocculant; aluminum sulfate

Introducción

Al cierre del año 2021, la industria dedicada al curtido y adobo de pieles a nivel regional congregó a un promedio de 123 empresas activas según la Superintendencia Nacional de Aduanas y de Administración Tributaria. Curtiembres cuyo principal inconveniente se encuentra en la adecuación ambiental según los valores Máximo Admisibles (VMA) establecidos en el DS 010-2019-VIVIENDA, propiciando así el inicio de procesos sancionadores y multas con las autoridades fiscalizadoras de Organismo de Evaluación y Fiscalización Ambiental - OEFA y SEDALIB. Además, La Libertad se caracteriza por ser una región del Perú con un clima que favorece el crecimiento de las plantas cactáceas, por lo que se vio esta oportunidad como un agente solucionador del problema.

Actualmente, los sistemas de tratamientos de aguas residuales convencionales emplean productos químicos, con un alto costo que incluye tomar medidas de contención para la salud de sus trabajadores, en respuesta a ello existen pruebas a nivel de investigación básica imparten avances en el uso de plantas como alternativas para el tratamiento de estos efluentes.

Mishra, Anuradha & Yadav, Alpa & Agarwal, Mahadev & S, Rajani. (2004) injertaron un floculante natural de *Plantago mucilage* con Poliacrilonitrilo (PAN) para la remoción de sólidos suspendidos y totales disueltos (TDS) de los efluentes de curtiembre. El floculante (copolímero) injertado se sintetizó extrayendo los principios activos de la planta mucílaga y haciéndolos reaccionar con ácido nítrico en un sistema Redox. El pH, dosis óptima de polímero y tiempo de contacto para la máxima remoción de SS y TDS fueron estudiados. La dosis óptima fue de 1.2 mg/L, el pH fue de 7 y 9.2 para remociones de 89% de SS y 27% de TDS, respectivamente, durante 3 horas.

Fuquene Yate, D. (2011), en el trabajo de investigación para optar al título de Magister en Ingeniería Ambiental en la Universidad Nacional de Colombia, señaló que el reciclaje de las aguas tratadas (mediante el tratamiento propuesto) de pelambre mixto (químico y enzimático) mostró que, a medida que se va recirculando el agua en un volumen de aproximadamente del 50%, la calidad de la piel apelambrada se mejora, lo que es causado por una remanencia de los productos químicos que no se remueven con el sistema de tratamiento propuesto, como los sulfuros, el nitrógeno y el amoníaco, ya que estos compuestos son base para la elaboración de agentes depilantes.

Kazi, T., & Virupakshi, A. (2013) estudiaron el uso de semillas de moringa y cactus como coagulantes naturales para reducir la turbidez y DQO de las aguas residuales de curtiembre. Se preparó el coagulante natural de cactus mediante el secado a 60°C por 24 horas de las especies de cactus frescos, cortados en pedazos de 1 cm; el material seco se dispuso en un molino de malla 600 μ m. Se determinó la dosificación y el pH óptimos de 4.5 y 5.5, 0.6 g/L y 0.4 g/L de moringa y cactus, respectivamente. La

reducción de turbidez encontrada fue de 82 y 79%, mientras que para el DQO fue de 83 y 75%, respectivamente.

Sellami et al. (2014) han estudiado el efecto del extracto del cactus como biofloculante en el proceso físico-químico para tratamiento de efluentes industriales comparando sus propiedades con poliacrilamida, un floculante comercial. Los efluentes industriales caso de estudio provinieron de industrias textiles y manufactura de goma. En los experimentos, el extracto de cactus se molió, filtró y fue conservado a 4°C hasta su uso, se empleó alúmina como coagulante. El biofloculante mostró eficiencias de remoción de 85% para sólidos suspendidos (SS) y 65% para demanda química de oxígeno (DQO). La adición de cal junto al extracto de cactus mejoró el proceso físico químico consiguiendo un efecto similar a la poliacrilamida con eficiencias mayores al 90% para SS y DQO.

Choque-Quispe, D., Choque-Quispe, Y., Solano-Reynoso, A. M., & Ramos-Pacheco, B. S. (2018) evaluaron la capacidad floculante de tres variedades de Cactáceas *Echinopsis pachanoi*, *Neoraimondia arequipensis* y *Opuntia ficus* en el tratamiento de agua residual artificial. Se aplicaron dosis del 1%, 2% y 3% de coagulante de las tres variedades de Cactáceas extraídas con los tres solventes al agua residual artificial, observándose un incremento significativo ($p\text{-value} < 0.05$) para la capacidad clarificante y el % de remoción, con el aumento de dosis de coagulante, presentando mejores resultados la variedad San Pedro. Los parámetros fisicoquímicos del agua tratada como el pH se incrementaron ligeramente de 6.61 del agua sin tratar a 7.58, mientras que la dureza y la alcalinidad no muestran diferencia significativa ($p\text{-value} > 0.05$), la DBO del agua con coagulante se incrementó con el porcentaje de aplicación.

Mozafarjalali, M., Hajiani, M., & Haji, A. (2020) evaluaron la eficiencia de la aptenia cordifolia mucilage (planta suculenta llamada Rocío) en la remoción de colorantes aniónicos de aguas residuales del proceso textil mediante procesos físico-químico. Se evaluaron parámetros como pH, concentración inicial de colorante, concentración de planta suculenta y temperatura en la eficiencia de remoción. Para producir el extracto de suculenta, las plantas fueron secadas, comprimidas y reposadas en frío por 48 horas, tras el tiempo, se recogió el sobrenadante y se usó como coagulante. Los resultados mostraron que la remoción máxima fue de 85.4% usando 5 mg de la planta a pH 4 en condiciones ambientales. Sin embargo, la aplicación de 1 mg de poli (propilen imina) dendrímero (PPI), un aditivo de uso común en colorantes, incrementaba la eficiencia de remoción de la suculenta a 92%. El estudio demuestra que el uso de esta planta puede ser beneficiosa, asequible y ecológico para industrias que usan colorantes.

No obstante, estas soluciones presentan inconvenientes en su aplicación al requerir la aplicación de medidas específicas de contención para salud, al sumarse el

riesgo de generar la proliferación de vectores infecciosos en grandes cantidades, creando focos de contaminación que reducirían la calidad del agua utilizada en el proceso de curtición.

El objetivo del presente artículo es medir la efectividad de las plantas cactáceas como coagulante natural, logrando medir su eficacia en la remoción de agentes contaminantes en las aguas residuales tomando como base las investigaciones previas que validan la eficacia y eficiencia del agente biorremediador en el tratamiento de aguas residuales.

Material y métodos

La metodología aplicada está dividida en cuatro (04) tiempos, el primero el proceso de obtención del floculante a partir de las plantas cactáceas, el segundo, análisis físico químico, tercero, análisis por espectrofotometría y finalmente, cuarto, determinación de variables de operación. Para ello se realizó la secuencia, contemplando las siguientes actividades.

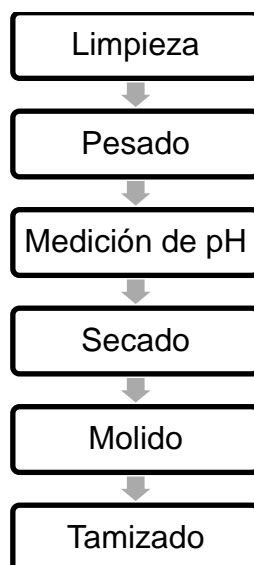
A. Proceso de obtención de polvo fino

La primera etapa del proceso inició con la recolección de dos tallos de cactus San Pedro (*Echinopsis pachanoi*), dos pencas de tuna (*Opuntia ficus-indica*) y una planta de sábila (*Aloeae*) libre de daños externo, para el procesamiento de la muestra se siguieron los siguientes pasos secuenciales:

- Se realizó el retiro de espinas y epidermis.
- Se dividieron en secciones similares para proceder al pesado, secado, tamizado y posterior análisis.
- El pesado se realizó en fresco, en seco y en el producto fino final.
- El secado se realizó en una estufa a temperatura constante de 105°C.
- El tamizado se realizó a 1000, 250 y 75 µm con un tamiz con USA standard test, ASTM E-11 standard.
- Se registró el pH del extracto fresco de secciones del cactus. Para ello se exprimió el contenido interno y se coló previo a la lectura en el pHmetro.

Figura 1

Diagrama de flujo del proceso de obtención de polvo fino



Nota. La imagen muestra los pasos secuenciales para la obtención de polvo fino a partir de las plantas cactáceas.

B. Análisis físico-químico

Una vez obtenido el polvo fino se procedió a realizar el análisis físico-químico en microscopio electrónico.

Tabla 1

Porcentaje de ceniza y pH de las muestras analizadas

| Parámetros | Unidad | Muestra | | |
|-------------|--------|-----------|--------|--------|
| | | San Pedro | Tuna | Sábila |
| Peso fresco | g | 1196.1 | 1196.1 | 1196.1 |
| Peso seco | g | 27.2 | 25.03 | 4.2 |
| % cenizas | % | 2.3 | 2 | 0.32 |
| % humedad | % | 97.7 | 98 | 99.68 |
| pH | unidad | 5.3 | 5.2 | 5.2 |

Nota: Parámetro evaluado en laboratorio.

De los resultados obtenidos, se determinó que las tres (03) muestras tienen un alto contenido de carbono fijo y bajo porcentaje de cenizas. Esto nos indicó tanto el

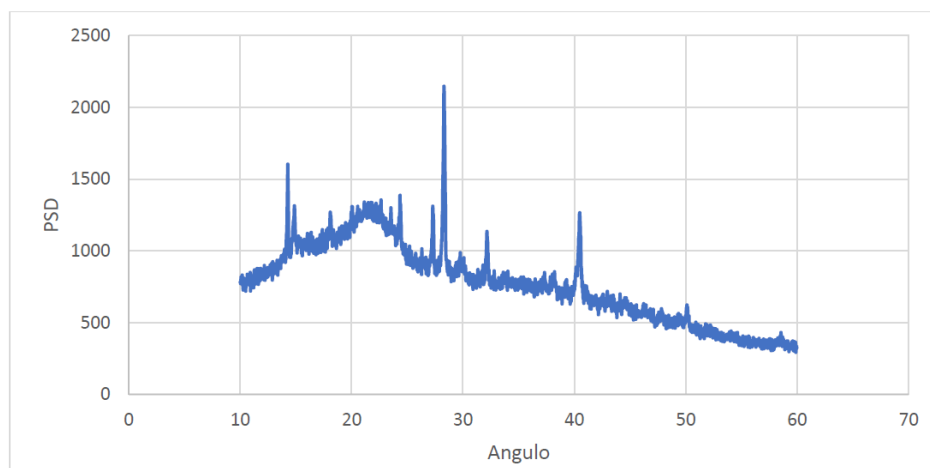
cactus, la tuna como la sábila son adecuados para preparar una estructura porosa, una condición necesaria para tener un área de superficie incrementada.

C. Análisis de espectrofotometría y difractómetro de rayos X

Las muestras previamente analizadas fueron sometidas a análisis por difractómetro de rayos X y espectrofotómetro de infrarrojo (FTIR).

Figura 2

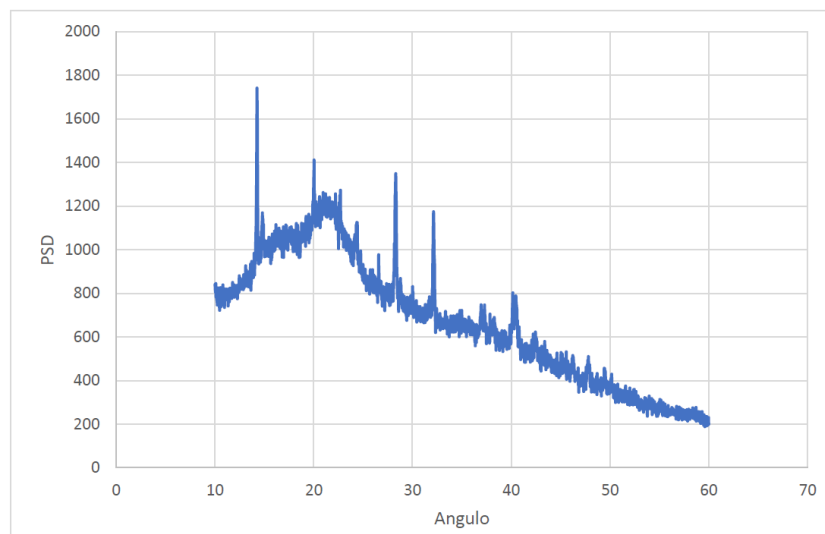
Resultados del Difractómetro de Rayos X



Nota: Lectura del difractómetro de rayos X de la muestra de cactus San Pedro.

Figura 3

Resultados del Difractómetro de Rayos X

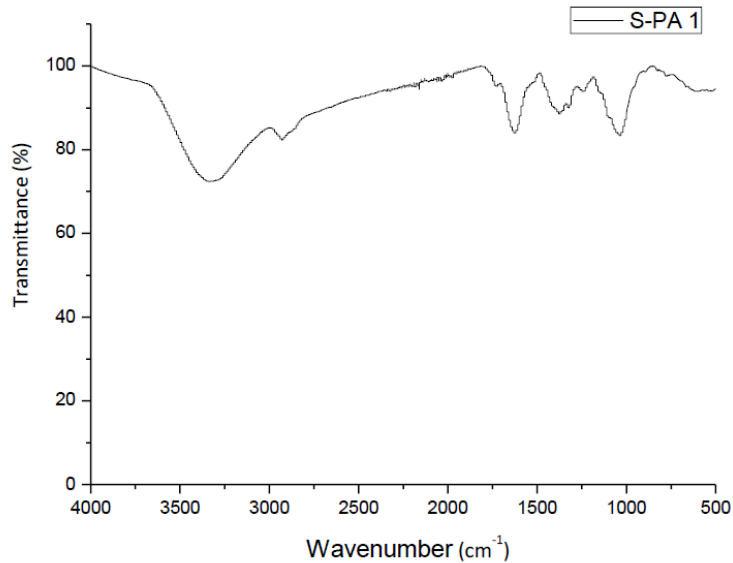


Nota: Lectura del difractómetro de rayos X de la muestra de penca de tuna.

En ambos casos, se observó similares picos en los mismos ángulos, pero con diferentes magnitudes.

Figura 4

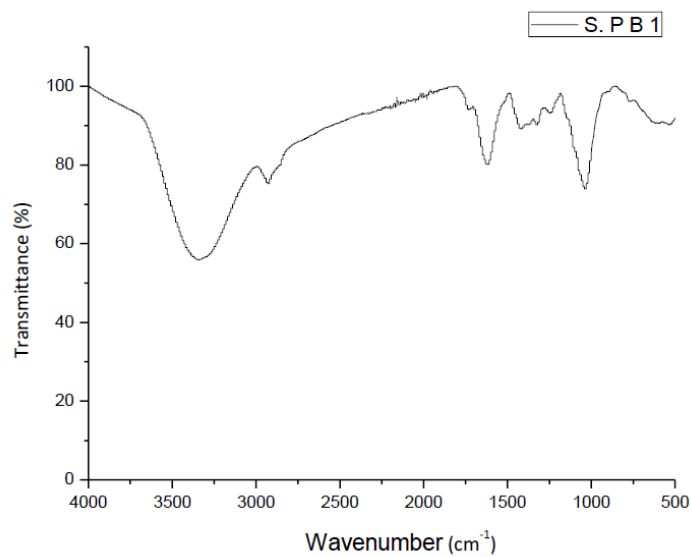
Resultados del Espectrofotómetro de Infrarrojo (FTIR)



Nota: Porcentaje de transmitancia versus longitud de onda de la muestra de cactus San Pedro.

Figura 5

Resultados del Espectrofotómetro de Infrarrojo (FTIR)



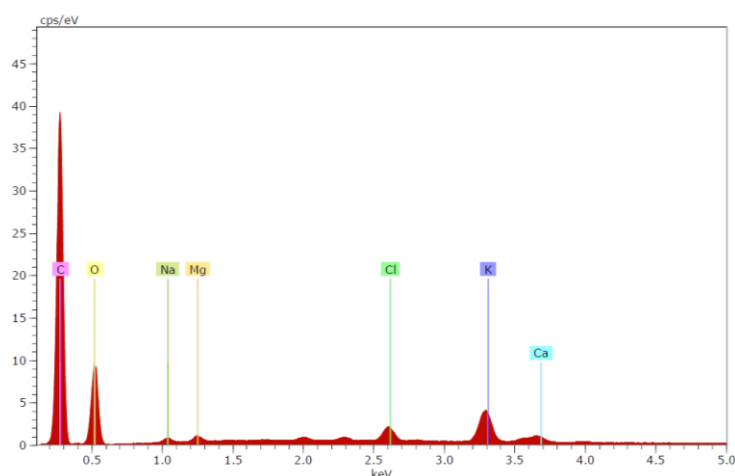
Nota: Porcentaje de transmitancia versus longitud de onda de la muestra de penca de tuna.

Los resultados del FTIR mostraron patrones muy similares en ambas muestras analizadas.

El área comprendida a los 3400 cm^{-1} nos indica estiramientos de vibraciones O-H de celulosa, pectina y lignina y los grupos N-H en la superficie biosorbente. Los picos del espectro alrededor de 1300 y 1050 cm^{-1} muestran la presencia de vibraciones de unión C-H de alcanos y la vibración de estrechamiento C-O, respectivamente.

Figura 6

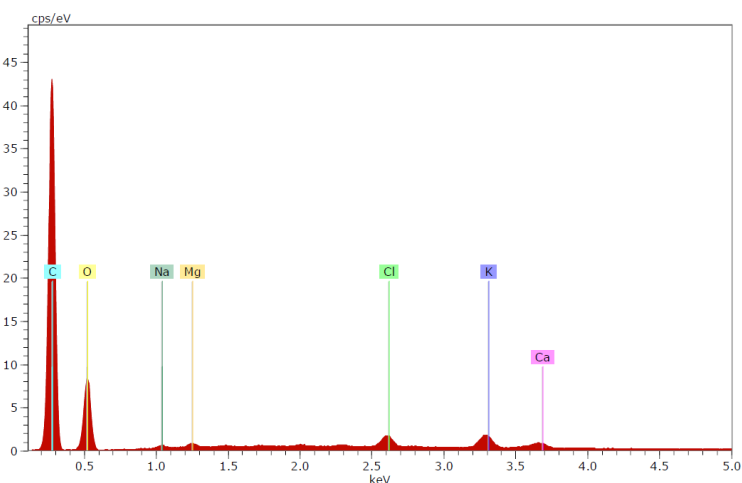
Resultados del microscopio electrónico de barrido (SEM)



Nota: Resultados para la muestra de cactus San Pedro.

Figura 7

Resultados del microscopio electrónico de barrido (SEM)



Nota: Porcentaje de transmitancia versus longitud de onda de la muestra de penca de tuna.

Del análisis de ambas muestras, se concluyó que las muestras contienen 69-72% de carbono, 27 a 29% de oxígeno, lo cual es esperado para muestras orgánicas. El contenido de calcio se encuentra en el rango de 0.09 a 0.10%, un componente esperado para las propiedades esperadas. Ninguna muestra contiene hierro, ni siquiera en trazas.

D. Determinación de variables de operación

Para determinar las variables de operación, se realizó experimentación recolectando dos (02) litros por proceso de remojo, pelambre y curtido. Para ello, se realizó diferentes mezclas en base a un (01) litro de muestra en un vaso de precipitación:

- 1L remojo principal.
- 600 mL remojo + 200 mL pelambre.
- 400 mL remojo + 400 mL pelambre.
- 600 mL de remojo + 200 mL pelambre.
- 1L sal.
- 1L de purga.
- 400 mL sal + 400 mL purga.
- 200 mL sal + 200 mL purga + 200 mL pelambre.
- 200 mL remojo + 300 mL sal + 300 mL de purga.
- 300 mL purga + 300 mL sal + 200 mL curtido.
- 400 mL remojo + 100 mL sal + 200 mL pelambre + 100 mL curtido.

Se colocó en el test de jarras tres (03) muestras con la misma mezcla en la cual se realizaron las variantes de dosificaciones según los insumos, los cuales fueron: oxidante, regulador de pH, coagulante y floculante. Las dosificaciones de cada insumo fueron de 3 - 10 ml, 0.5 - 2 ml, 1 - 1.5 y g de San Pedro, Tuna y sábila, respectivamente. Estas variaciones de dosificaciones permiten comprender cómo se llevaron a cabo los experimentos y cómo se controlar las condiciones para evaluar la eficacia del tratamiento de aguas residuales.

Los parámetros que se evaluaron en el test de jarras, la cual es una técnica utilizada para simular el proceso de tratamiento de aguas residuales a pequeña escala en el laboratorio, calculó los parámetros evaluados, que son: el tiempo de agitación, que para estas pruebas fue de 15 minutos, la velocidad de rotación por minuto (RPM) durante la coagulación que es 150, la RPM durante la floculación, que consistió en 70, y la cantidad de cada insumo utilizado en el tratamiento de las muestras de aguas residuales. Estos insumos incluyen oxidante, regulador de pH, coagulante y floculante.

Se procede a realizar el análisis de las muestras. Para esto, se tomó una muestra de 5 ml del sobrenadante, para posteriormente agregar en el tubo de vidrio y colocar en el turbidímetro, para evaluar la concentración de sólidos eliminados por tratamiento aplicado.

Figura 8

Análisis por test de jarras



Nota: La imagen muestra la separación del análisis en el test de jarras.

Resultados

La remoción ha sido excepcional al finalizar el tratamiento, demostrando que logró ser eficaz el floculante propuesto al lograr una reducción de hasta 98.993%, cumpliendo así los valores máximos admisibles y límites máximo permisibles de la normativa ambiental.

Tabla 2

Resultados de parámetros con respecto a la muestra de remojo principal

| | Muestra de Remojo principal | | | | Parámetros | |
|------------------------|-----------------------------|------|-----------|--------|------------|--------|
| | M-1 | M-2 | M-3 | M-4 | RPM | Tiempo |
| pH inicial | 8.5 | 8.5 | 8.5 | 8.5 | - | - |
| Peroxido (mL) | 5 | 5 | 5 | 5 | 70 | 5 |
| Regulador de pH | 0.5 | 0.5 | 0.5 | 0.5 | 70 | 5 |
| pH trabajo | 7 | 7 | 7 | 7 | - | - |
| Coagulante | 1.5 | 1.5 | 1.5 | 1.5 | 160 | 15 |
| Floculante | 2 | tuna | San pedro | Sábila | 65 | 15 |

Nota: Empieza la formación de espuma a los 3 minutos luego que se agregó el peróxido, el agua al finalizar tiene una turbidez mayor a 1000 ppm.

Tabla 3*Resultados obtenidos en la muestra de efluente de remojo pelambre*

| | 600 Remojo + 200 Pelambre | | | | | | Parámetros | |
|------------------------|---------------------------|--------|-----------|-------|--------|-----------|------------|--------|
| | M-1 | M-2 | M-3 | M-4 | M-5 | M-6 | RPM | Tiempo |
| pH inicial | 11 | 11 | 11 | 11 | 11 | 11 | | |
| Peróxido (mL) | 3 | 3 | 3 | 3 | 3 | 3 | 70 | 5 |
| | 0 | 0 | 0 | 5 | 5 | 5 | | 5 |
| | 0 | 0 | 0 | 3 | 3 | 3 | | 5 |
| Regulador de pH | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 70 | 5 |
| pH trabajo | 7 | 7 | 7 | 7 | 7 | 7 | | |
| Coagulante | 0.5 SA | 0.5 SA | 0.5 SA | 2 PAC | 2PAC | 2 PAC | 155 | 15 |
| Floculante | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 65 | 15 |
| | Tuna | Sábila | San Pedro | Tuna | Sábila | San Pedro | | |
| Turbidez | | 718.6 | 890.6 | | 1000 | 917.4 | | |

Nota: Se observó la formación de espuma en la parte superior, y la emulsión de grasas, las cuales quedaron en la superficie. Se dio una precipitación lenta para las tres (03) primeras muestras tras 45 minutos. Solo sedimentaron 2 cm, las tres muestras siguientes fueron más rápidas, pero aún con presencia de sólidos en el sobrenadante, se obtuvo 400 mL de sobrenadante de la M6.

Tabla 4*Resultados de la mezcla de remojo y pelambre*

| Variables | 600 Remojo + 200 Pelambre | | | | Parámetros | |
|------------------------|---------------------------|------|-----------|-----------|------------|--------|
| | M-1 | M-2 | M-3 | M-4 | RPM | Tiempo |
| pH inicial | 8.5 | 8.5 | 8.5 | 8.5 | - | - |
| Peróxido (mL) | 15 | 15 | 15 | 15 | 70 | 5 |
| Regulador de pH | 1 | 1 | 1 | 1 | 70 | 5 |
| pH trabajo | 7 | 7 | 7 | 7 | - | - |
| Coagulante | 2 | 2 | 2 | 2 | 155 | 15 |
| Floculante | San pedro | tuna | San pedro | San pedro | 65 | 15 |

Nota: Empieza la formación de espuma a los 3 minutos luego de agregar el peróxido, el agua al finalizar tiene una turbidez mayor a 1000 ppm.

Tabla 5
Resultados de la mezcla de remojo y pelambre

| | 400 R + 400 P | 600 R + 200 P | 600 R+ 200 P |
|-----------------|---------------|---------------|--------------|
| Variable | M-4 | M-5 | M-6 |
| pH inicial | 7 | 10 | 10 |
| | 5 | 5 | 5 |
| Peróxido (mL) | 3 | 3 | 3 |
| | 5 | 5 | 5 |
| Regulador de pH | 0 | 0 | 0 |
| Coagulante | ½ TAPA | 1 TAPA | ½ TAPA |
| Floculante | San Pedro | San Pedro | Tuna |
| Turbidez | 567.5 | 817.5 | 148.8 |

Nota: La sedimentación es muy lenta y se observa la emulsión de grasa en la parte superior.

Tabla 6
Resultados de parámetros de remojo y pelambre – floculante San Pedro y Tuna

| Variable | Sal | Sal | Purga | Purga |
|---------------------|-----------|-----------|-----------|-----------|
| pH inicial | 9 | 9 | 9 | 9 |
| Peróxido | 1 | 0 | 1 | 0 |
| Ácido | 0 | 0 | 0 | 0 |
| pH trabajo | 9 | 9 | 9.5 | 9 |
| Sulfato de aluminio | 3 | 3 | 3 | 3 |
| Floculante | San pedro | San Pedro | San Pedro | San Pedro |
| Turbidez | >1000 | >1000 | >1000 | >1000 |

Nota: La Sedimentación lenta con formación de la formulación de flóculos muy finos que quedan en suspensión.

Tabla 7*Resultados de parámetros de remojo y pelambre – floculante San Pedro y Tuna*

| | 400R+400P | 600R+200P | 600R+200P | 600R+200P | 600R+200P |
|------------------------|----------------------------|-----------|-----------|-----------|-----------|
| | M1 | M1 | M2 | M3 | M4 |
| pH inicial | 12.5 | 10 | 10 | 10 | 10 |
| Peróxido (mL) | 8 | 8 | 8 | 8 | 8 |
| Regulador de pH | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| pH trabajo | 12 | 10 | 10 | 10 | 10 |
| Coagulante | Sulfato de aluminio 1 tapa | | | | |
| Floculante | San Pedro | San Pedro | San Pedro | Tuna | Tuna |
| Turbidez | - | - | - | - | - |

Nota: La Sedimentación lenta con formación de la formulación de flóculos muy finos que quedan en suspensión.

Tabla 8*Resultados de parámetros de remojo y pelambre – floculante San Pedro y Tuna*

| | Sal | Sal | Purga | Purga | 400 Sal + 400 Purga |
|----------------------------|--------------|--------------|-----------|--------------|------------------------|
| pH inicial | 9 | 9 | 9 | 9 | 9 |
| Peróxido | 1 | 0 | 1 | 0 | 1 |
| Ácido | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| pH trabajo | 9 | 9 | 9.5 | 9 | 9 |
| Sulfato de aluminio | 3 | 3 | 3 | 3 | 3 |
| Floculante | San pedro | San Pedro | San Pedro | San Pedro | San Pedro |
| Turbidez | >1000 | >1000 | >1000 | >1000 | >1000 |

Nota: Se observa la precipitación; sin embargo, se observó espuma al inicio del proceso y, a pesar de que sedimentó, no hubo una remoción óptima de sólidos suspendidos.

Tabla 9
Resultados de parámetros de sal y purga

| Variable | Sal | Purga | 400 Sal + 400 Purga | 200 Pel + 200 Purga+ 200 Sal |
|------------------------|--------------|--------------|------------------------|---------------------------------|
| pH inicial | 9 | 9 | 9 | 9.5 |
| Peróxido | 6 | 6 | 6 | 6 |
| Ácido | 0 | 0 | 0 | 0 |
| pH trabajo | 9 | 9 | 9 | 9.5 |
| Sulfato de aluminio | 8 | 8 | 8 | 8 |
| Floculante | San pedro | San Pedro | San Pedro | San Pedro |
| Turbidez | >1000 | >1000 | >1000 | >1000 |

Nota: Se observó sedimentación muy lenta, puesto que, para evaluarla, se requiere 24 horas; además, la remoción de sólidos no es la adecuada.

Tabla 10
Resultados de parámetros de sal y purga

| Variable | Purga | Sal | Remojo 200+ Sal 300+ Purga 300 | 400 Sal + 400 Purga | 400 Sal + 400 Purga | 401 Sal + 400 Purga |
|------------------------|-------|------|---|------------------------|------------------------|------------------------|
| pH inicial | 9 | 9 | 7 | 9 | 9 | 9 |
| Peróxido | 5 | 5 | 5 | 5 | 5 | 5 |
| Ácido | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| pH trabajo | 9 | 9 | 4 | 5 | 5 | 7 |
| Sulfato de aluminio | 1 gr | 1 gr | 1 gr | 1 gr | 1 gr | 1 |
| Floculante | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 |
| Turbidez | - | - | 215.6 | - | 25.01 | 20.76 |

Nota: Se evidenció una sedimentación más rápida para las muestras que presentan mezcla. El sólido generado fue también muy fino.

Tabla 11
Resultados de parámetros de procesos varios de efluentes

| Variables | sal+purg 400C/U | sal+purg 400C/U | sal+purg 400C/U | Pu 300 + sal300 +200Cu | 300 pu + 300sa +200Cu | 300 pu+sa 300 +200Cu |
|------------------------|--------------------|--------------------|--------------------|------------------------------|-----------------------------|----------------------------|
| | M1 | M2 | M3 | M4 | M5 | M6 |
| pH inicial | 8.5 | 8.5 | 8.5 | 7.5 | 7.5 | 7.5 |
| Peróxido | 3 | 3 | 3 | 3 | 3 | 3 |
| Ácido | 1 | 1 | 1 | 0 | 0 | 0 |
| pH trabajo | 7 | 7 | 7 | 7 | 7 | 7 |
| Sulfato de aluminio | 1 g | 1 g | 1 g | 1 g | 1 g | 1g |
| Floculante | 2 | 2 | 2 | 2 | 2 | 2 |
| Turbidez | 26.95 | 20.27 | 22.94 | 189.9 | 10.07 | 15.51 |

Nota: Se evidenció un exceso de peróxido para las mezclas que tienen agua de curtido debido a que la mezcla en un inicio sedimentó, pero luego empezó a flotar y terminó en la parte superior del proceso, haciendo un proceso DAF (Proceso de flotación).

Tabla 12
Resultados de parámetros de procesos varios de efluentes

| Variables | Remojo | Pelambre | 400 remojo + 400 pelambre | 200 Remojo +200 pelambre + 200 sal + purga 200 | Sal 300 + 300 remojo +300 purga | 400 remojo + 100 sal + 200 pelambre + 100 curtido |
|------------------------|--------|----------|------------------------------------|---|--|--|
| | M1 | M2 | M3 | M4 | M5 | M6 |
| pH inicial | 7 | 13 | 11 | 9 | 8 | 8 |
| Peróxido | 8 | 8 | 8 | 3 | 3 | 3 |
| Ácido | 0 | 3 | 1 | 1.5 | 1.5 | 0.5 |
| pH trabajo | 7 | 7 | 7 | 7 | 7 | 7 |
| Sulfato de aluminio | 7 | 13 | 11 | 9 | 8 | 8 |
| Floculante | 2 | 2 | 2 | 2 | 2 | 2 |
| Turbidez | 200 | 79.76 | 212.3 | 61.58 | 47.18 | 110.7 |

Nota: Al cabo de 2 horas y media, se evidenció la separación de las 02 fases: sólido y líquido. No presentó emulsión de grasas. Sin embargo, el sólido generado sí es un sólido muy fino.

Tabla 13*Matriz comparativa resumen de aplicación de plantas cactáceas*

| Mezclas | Floculante | Turbidez | Remoción |
|---------|------------|----------|----------|
| M1 | San Pedro | 567.5 | 43.25 |
| M2 | San Pedro | 817.5 | 18.25 |
| M3 | Tuna | 148.8 | 85.12 |
| M4 | Sábila | 718.6 | 28.14 |
| M5 | San Pedro | 890.6 | 10.94 |
| M6 | Tuna | 1000 | 0 |
| M7 | Sábila | 1000 | 0 |
| M8 | San Pedro | 917.4 | 8.26 |
| M9 | San Pedro | 215.6 | 78.44 |
| M10 | San Pedro | - | 100 |
| M11 | San Pedro | 25.01 | 97.499 |
| M12 | San Pedro | 20.76 | 97.924 |
| M13 | San Pedro | 26.95 | 97.305 |
| M14 | San Pedro | 20.27 | 97.973 |
| M15 | San Pedro | 22.94 | 97.706 |
| M16 | San Pedro | 189.9 | 81.01 |
| M17 | San Pedro | 10.07 | 98.993 |
| M18 | San Pedro | 15.51 | 98.449 |

Nota: Resumen de las muestras indicando tipo de floculante, turbidez y porcentaje de remoción.

Discusión

El tratamiento de efluentes de curtiduría con el floculante a partir de las distintas plantas cactáceas supone una remoción mayor, a diferencia de las investigaciones pasadas, pues se logró obtener una remoción mayor a 70.0% del floculante a partir del cactus San Pedro con hasta 99.0%, la cual corresponde a la mezcla de procesos de 300 de purga, 300 sal y 200 cromo; todo ello bajo las condiciones de operación establecidas y validadas, permitiendo así el cumplimiento de los valores máximos admisibles del DS 010-2019-VIVIENDA.

La alternativa de usar plantas como biofloculante para remover en aguas residuales industriales mediante procesos físico químicos ha sido validado y demostró su eficacia, pues Sellami et al. (2014) estudiaron el efecto del extracto del cactus como biofloculante en el proceso físico-químico para tratamiento de efluentes industriales. En los experimentos, el extracto de cactus se molió, filtró y fue conservado a 4C° hasta su uso, se empleó alúmina como coagulante. El biofloculante mostró eficiencias de

remoción de 85.0% para sólidos suspendidos (SS) y 65.0% para demanda química de oxígeno (DQO). Este mismo proceso fue el empleado en nuestra investigación, pero combinando con Sulfato de aluminio como coagulante, que permitió obtener remociones de hasta 99%.

En un estudio realizado por Mishra, Anuradha & Yadav, Alpa & Agarwal, Mahadev & S, Rajani. (2004), se injertó un floculante natural de *Plantago mucilage* con Poliacrilonitrilo (PAN) para la remoción de sólidos suspendidos y totales disueltos (TDS) de los efluentes de curtiembre. El floculante (copolímero) injertado se sintetizó extrayendo los principios activos de la planta mucílaga y haciéndolos reaccionar con ácido nítrico en un sistema Redox. El pH, dosis óptima de polímero y tiempo de contacto para la máxima remoción de SS y TDS fueron estudiados. La dosis óptima fue de 1.2 mg/L, el pH fue de 7.0 y 9.2 para remociones de 89.0% de SS y 27.0% de TDS, respectivamente durante 3 horas.

Nuestro estudio evidencia en torno al uso de cactus San Pedro, para el cual se utilizó la dosis de 1.0 mg/L de sulfato de aluminio, 2.0 mg/l de biofloculante, el pH fue de 7.0 para remociones de 99.0%, obteniendo una turbidez de 10.1.

Choque-Quispe, D., Choque-Quispe, Y., Solano-Reynoso, A. M., & Ramos-Pacheco, B. S. (2018) evaluaron la capacidad floculante de tres variedades de Cactáceas: *Echinopsis pachanoi*, *Neoraimondia arequipensis* y *Opuntia ficus* en el tratamiento de agua residual artificial. Se aplicaron dosis del 1%, 2% y 3% de coagulante de las tres variedades de Cactáceas extraídas con los tres solventes al agua residual artificial, observándose un incremento significativo ($p\text{-value} < 0.05$) para la capacidad clarificante y el % de remoción, con el aumento de dosis de coagulante, presentando mejores resultados la variedad San Pedro. Con el procedimiento que fue aplicado en nuestra investigación, fueron exitosos los resultados contrastados también con la variedad San Pedro, contra la normativa ambiental vigente.

Conclusiones

De los ensayos realizados, se logró obtener una remoción mayor a 70%, obteniendo que el floculante de mayor porcentaje de remoción es el obtenido a partir del cactus San Pedro con hasta 99%, la cual corresponde a la mezcla de procesos de 300 purga, 300 sal y 200 cromo; todo ello bajo las condiciones de operación establecidas y validadas, permitiendo así el cumplimiento de los valores máximos admisibles del DS 010-2019-VIVIENDA.

Agradecimientos e información de financiamiento

Un especial agradecimiento al Programa Nacional de Desarrollo Tecnológico e Innovación - Proinnóvate por el cofinanciamiento para el desarrollo de la presente investigación y por su apoyo en la generación de proyectos innovadores, seleccionando, cofinanciando y acompañando técnicamente a los mismos, para así promover la investigación aplicada y desarrollo de nuevos productos orientados al desarrollo y fortalecimiento de los distintos actores del ecosistema de innovación, lo cual se reflejará en el incremento de la competitividad y productividad empresarial en el país.

Contribución de autoría

Juan Carlos Mariños Legendre, Bertha Beatriz Anhuaman Namoc, Fiorella Carolina Morillo Méndez, Juan Carlos Cabrera La Rosa y Pedro Pablo Luján Castillo, concibieron la idea, diseñaron el estudio, recogieron los datos y realizaron el análisis e interpretación de datos. Maricielo Campos Gutiérrez y Ana Isabel Huamán Jiménez realizaron la búsqueda bibliográfica, revisaron el borrador y elaboraron el primer borrador. Miguel Elías Pinglo Bazán, Gina Lilibeth Jaeger Lozano y, José Alonso Peláez Quevedo hicieron la revisión crítica de su contenido y revisión final de la versión que va a publicarse.

Conflictos de interés

Los autores declaran que no existen conflictos de interés.

Referencias bibliográficas

Choque-Quispe, D., Choque-Quispe, Y., Solano-Reynoso, A. M., & Ramos-Pacheco, B. S. (2018). Capacidad floculante de coagulantes naturales en el tratamiento de agua. *Tecnología Química*, 38(2), 348-361.

Decreto Supremo N° 010-2019-VIVIENDA que aprueba el Reglamento de Valores Máximos Admisibles (VMA) para las descargas de aguas residuales no domésticas en el sistema de alcantarillado sanitario. *El peruano*, 11 de marzo de 2019, 17-31. <https://busquedas.elperuano.pe/normaslegales/decreto-supremo-que-aprueba-el-reglamento-de-valores-maximos-decreto-supremo-n-010-2019-vivienda-1748339-3/>

Fuquene Yate, D. (2011). *Optimización del uso del agua en la etapa de pelambre en un*

proceso que permita la mejor calidad del cuero final y el menor impacto ambiental [Tesis de maestría, Universidad Nacional de Colombia].
<https://repositorio.unal.edu.co/handle/unal/7608>

- Kazi, T., & Virupakshi, A. (2013). Treatment of tannery wastewater using natural coagulants. *International Journal of Innovative Research in Science, Engineering and Technology*, 2(8), 4061-4068.
- Mishra, A., Yadav, A., Agarwal, M. & Rajani, S. (2004). Polyacrylonitrile-grafted Plantago psyllium mucilage for the removal of suspended and dissolved solids from tannery effluent. *Colloid and Polymer Science*, 282. 300-303.
<https://doi.org/10.1007/s00396-003-0895-0>
- Mozafarjalali, M., Hajiani, M., & Haji, A. (2020). Efficiency of Aptenia Cordifolia Mucilage in Removal of Anion Dyes from Aqueous Solution. *International Journal of New Chemistry*, 7(2), 111-124.
<https://doi.org/10.22034/ijnc.2020.119029.1082>
- Sellami, M., Zarai, Z., Khadhraoui, M., Jdidi, N., Leduc, R. & Rebah, F.B. (2014). Cactus juice as bioflocculant in the coagulation–flocculation process for industrial wastewater treatment: a comparative study with polyacrylamide. *Water Science and Technology*, 70(7), 1175 – 1181.
<https://doi.org/10.2166/wst.2014.328>