

Eficiencia de la *Opuntia ficus indica* como coagulante para el tratamiento de las aguas residuales grises y su aplicación en un sistema piloto

Efficiency of Opuntia ficus indica as a coagulant for gray wastewater treatment and its application in a pilot system

Evilson Jaco ^{ORCID}^{a1*}, Walter Gómez ^{ORCID}^{a2}, Frank Loroña ^{ORCID}^{a3}, Noe Zamora ^{ORCID}^{a4}, Noemí Huaman ^{ORCID}^{a5}

^a Universidad Nacional Federico Villarreal. C. Carlos Gonzalez 285, San Miguel 15088, Perú.

E-mail: ^{a1} evilson.unfv@gmail.com, ^{a2} jgomez@unfv.edu.pe, ^{a3} florona@unfv.edu.pe, ^{a4} nzamora@unfv.edu.pe, ^{a5} 2015017153@unfv.edu.pe

*Autor para correspondencia

Recibido: 06/04/2022

Aceptado: 12/07/2022

Publicado: 31/07/2022

Citar como: Jaco, E., Gómez, W., Loroña, F., Zamora, N., Huaman, N. 2022. Efficiency of *Opuntia ficus indica* as a coagulant for gray wastewater treatment and its application in a pilot system. *Ingeniería del agua*, 26(3), 157-171. <https://doi.org/10.4995/la.2022.17478>

RESUMEN

La presente investigación tiene como objetivo evaluar la eficiencia del *Opuntia ficus indica* como coagulante en el tratamiento de las aguas grises, para ello se trabajó con una serie de pruebas compuestas para diferentes cantidades de coagulante, este último se preparó en forma de polvo a partir de la *Opuntia ficus indica*. Se han caracterizado los parámetros fisicoquímicos del agua residual gris, se aplicó el coagulante en el equipo de prueba de jarras y se determinó la dosis óptima del coagulante con base en la variación de los parámetros de calidad. Como resultado se obtuvo un agua inicialmente por encima de los Estándares de Calidad Ambiental para Agua (D.S. N° 004-2017) y la Guía de la Agencia de Protección Ambiental para reutilización de aguas residuales, una dosis óptima de 1.625 g/l y al ser aplicado en el sistema piloto de tratamiento primario, se obtuvieron los siguientes porcentajes de remoción: 96.67% de SST, 88.19% de Turbidez, 72.98% de DBO₅ y 72.81% de Nitrito; en el caso de pH se alcanzó una reducción en 30.37%; se concluye que el coagulante natural es eficiente para el tratamiento de aguas residuales grises y puede usarse para riego no restringido de vegetales.

Palabras claves: Aguas grises, coagulante natural, *Opuntia ficus indica*, mucílago, sistema piloto.

ABSTRACT

The objective of this research is to evaluate the efficiency of *Opuntia ficus indica* as a coagulant in the treatment of gray water, for which a series of tests were carried out for different amounts of coagulant, the latter was prepared in powder form from *Opuntia ficus indica*. The physicochemical parameters of the gray wastewater have been characterized, the coagulant was applied in the jar test equipment and the optimal dose of the coagulant was determined based on the variation of the quality parameters. As a result, water was initially obtained above the Environmental Quality Standards for Water (D.S. No. 004-2017) and the Guide of the Environmental Protection Agency for reuse of wastewater, an optimal dose of 1,625 g / l and being applied in the primary treatment pilot system, the following removal percentages were obtained: 96.67% TSS, 88.19% Turbidity, 72.98% DBO₅ and 72.81% Nitrite; in the case of pH, a reduction in acidity of 30.37% was reached; It is concluded that the natural coagulant is efficient for the treatment of gray wastewater and can be used for unrestricted irrigation of vegetables.

Keys word: Grey waters, natural coagulant, *Opuntia ficus indica*, mucilage, pilot system.

INTRODUCCIÓN

La escasez progresiva del agua en diferentes regiones del planeta y el incremento en la demanda de agua dulce por la población ya sea en centros urbanos o rurales, ha empezado a promover un interés creciente en la reutilización de aguas grises (PNUD, 2006). Según Andía (2000) solo en Lima Metropolitana se consume de 150 a 160 l/habitante/día en necesidades como alimentación y aseo. De la misma forma, en el Perú, Collacci (2018) explica que las aguas grises son vertidas directamente a las redes de alcantarillado, donde se mezclan con las aguas negras y otros desechos orgánicos, posteriormente estas aguas son conducidas a las plantas de tratamiento de aguas residuales para finalmente ser vertidas en los ríos aledaños.

Del mismo modo según Franco (2007) las aguas grises son aguas residuales domésticas con excepción de las provenientes de inodoros y urinarios, llamadas aguas negras, otros excluyen además de esta definición aguas provenientes de la cocina. El mismo autor menciona que estudios realizados en diferentes países indican que el porcentaje de aguas grises, presentes en aguas servidas domésticas, se encontraría entre 50 a 80 %. La composición de las aguas grises es también un factor variable, dependiendo de las costumbres de las personas, lugar, tiempo, de los productos de limpieza ocupados, del número de personas en la vivienda, de las características del agua potable, de la época del año, de la hora del día, del clima, entre muchos factores (Franco, 2007). Además, podría haber degradación química y biológica de los compuestos químicos, dentro de la red de transporte y durante el almacenamiento (Niño y Martínez, 2013).

Así mismo las aguas grises poseen nutrientes en cantidades mucho menores que las negras, presentando aproximadamente solo el 10% del nitrógeno, el 21% del potasio y 26% del fósforo del total en aguas servidas domésticas (Jenssen y Vrale, 2003) y en cuanto a los patógenos se encuentran en bajas cantidades, siendo generalmente sobreestimada la carga fecal al medir bacterias indicadoras, ya que pueden presentar crecimiento (World Health Organization, 2006).

Por otro lado, en la actualidad se están utilizando coagulantes químicos para el tratamiento de aguas en desuso, los cuales en cantidades altas pueden producir daños a la salud como el mal de alzheimer, enfermedades neurodegenerativas o el cáncer; hacer que el tratamiento sea más costoso y requiera mayor tiempo en su proceso (Andia, 2000). En ese sentido, existe un interés por determinar mejores técnicas disponibles para realizar el tratamiento de las aguas grises, al respecto, son muchas las posibilidades de tratamiento de las aguas grises; tantas como para las aguas residuales, o incluso más, puesto que para las grises se han diseñado sistemas a pequeña escala que no se usan con otros tipos de aguas residuales (Gual, 2005); ante ello Franco (2007) menciona que, existe una gran variedad de sistemas de tratamiento para recuperar aguas grises, estos sistemas ocupan procesos que pueden ser de tipo primario, secundario o terciario; pueden ser químicos, como coagulación y floculación; físicos, como filtración y decantación; biológicos como lodos activados, filtros aireados y humedales; y de desinfección como cloración, ozonificación y radiación UV.

Cabe precisar que no se encontraron estudios referidos a tratamiento de aguas residuales grises con coagulantes naturales, sino más bien su aplicación de estos para tratar agua potable, aguas crudas de río, canales, lagos o agua contaminado con lodos; todos estos estudios concluyen y coinciden en la efectividad del mucílago extraído de la tuna para la clarificación del agua.

En el presente trabajo de investigación se evaluó la eficiencia del coagulante *Opuntia ficus indica*, el cual está caracterizado por la producción de un hidrocoloide comúnmente conocido como mucílago (Quispe, 2012), este polisacárido es una sustancia pegajosa y por lo tanto poco manejable, cada molécula del mucílago puede contener más de 30 000 subunidades de azúcar, o residuos (Quispe, 2012). Estudios sobre su estructura y composición han determinado que la presencia de compuestos específicamente como L-arabinosa, ácido D-galacturónico, D-galactosa, D-xilosa, L-ramnosa, al ser polisacáridos permiten aglutinar sustancias presentes en el agua, actuando de esta forma como un coagulante natural (Sepúlveda y Graham, 2007; Loza et al., 2012).

MATERIAL Y MÉTODO

Caracterización de las aguas grises

En primer lugar, se recolectó el agua gris doméstica proveniente de la lavadora, del fregadero, del lavabo y la ducha (Figura 1) del domicilio ubicado en el AA. HH Villa Solidaridad - San Juan de Miraflores, Lima.

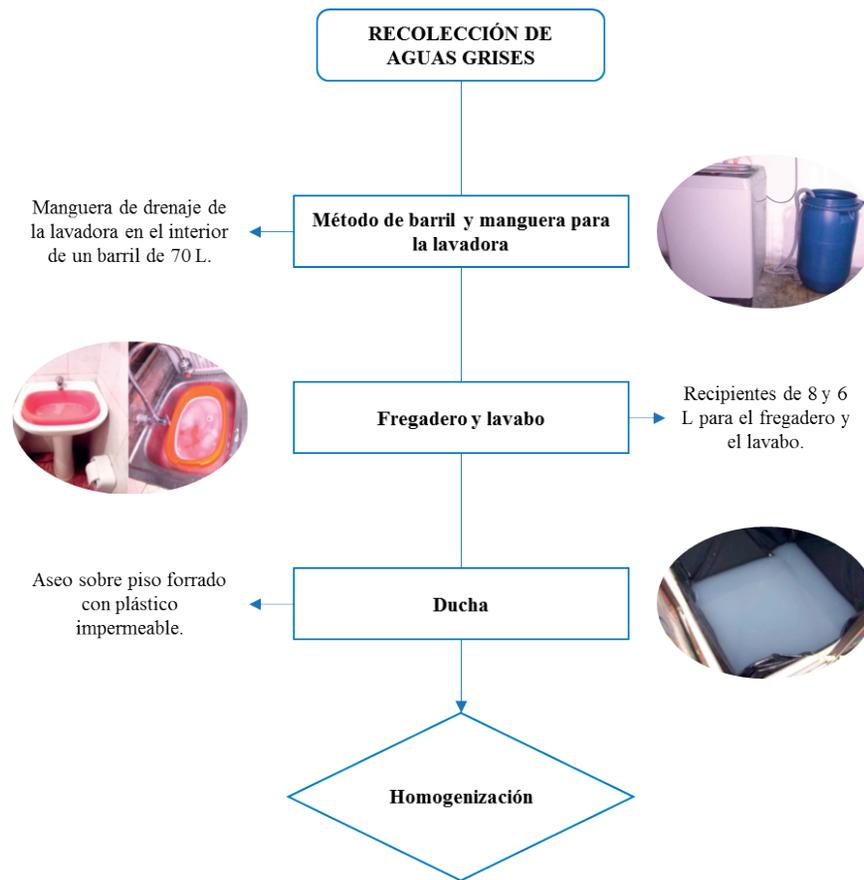


Figura 1 | Recolección de las aguas grises.

Una vez recolectada el agua residual gris, ésta fue transvasada con embaces aforados que permitieron la medición equitativa de los volúmenes generados en cada punto antes mencionado. Para la formación de las muestras compuestas se extrajeron volúmenes iguales, es decir se recolectaron 30 L de cada fuente, luego se homogenizaron en un recipiente de 60 L; extrayendo 15 L de cada fuente recolectada. Las muestras fueron llevadas al laboratorio para su respectivo análisis de pH, SST, Turbidez, DBO₅ y Nitrito; y conocer sus concentraciones iniciales.

Estimación del gasto de agua a tratar en una casa promedio

En segundo lugar, se estimó la cantidad recolectada de aguas grises que produce cada fuente (lavadora, fregadero, lavabo y ducha), considerando una vivienda unifamiliar de cinco habitantes, para tal caso se empleó la sección “Estimado de los flujos de aguas grises” del Manual de diseño para manejo de aguas grises para riego exterior (Allen, 2015).

Cálculo de los flujos semanales de aguas grises

a: Lavadora

En la vivienda unifamiliar de tres pisos con cinco habitantes, cada persona hace una carga de lavandería a la semana, dando un total de cinco cargas por semana; se distribuye el uso de la lavadora a lo largo de la semana, algunas veces haciendo dos cargas de lavandería en un día; la lavadora del cual se dispone es una de carga frontal, con índices de 100 litros equivalente a 26 galones (Para el cálculo de generación de aguas grises, se consideró que 1 galón equivale a 3.8 litros) por carga.

$$V(L) = N \times n(\text{gal}) \times 3.8(L/\text{gal}) \quad (1)$$

V: Volumen semanal, N: Número de cargas, n: Cantidad de galones

b: Ducha

Las cinco personas en el hogar se bañan en un lapso de aproximadamente 15 minutos distribuyéndose de la siguiente forma, tres (3) personas en el hogar se bañan durante 15 minutos diarios, mientras las otras dos (2) persona se baña 3 veces a la semana, por 15 minutos. Se considera que el índice de la ducha estándar es de 1.5 gpm, al respecto se tiene:

$$V(L) = P \times I(\text{gpm}) \times T(\text{min}) \times N \times 3.8(L/\text{gal}) \quad (2)$$

V: Volumen semanal, P: N° personas, I: Índice de flujo de ducha, T: Minutos de baño, N: Número de baños por semana.

c: Lavabos de baño

Los integrantes de la vivienda familiar realizan la higiene personal en el lavabo de aproximadamente tres (3) veces a al día con una duración de 1 minuto, sabiendo que el índice de flujo del lavabo es de 2 gpm, se tiene lo siguiente:

$$V(L) = N \times I(\text{gpm}) \times T(\text{min}) \times D \times 3.8(L/\text{gal}) \quad (3)$$

V: Volumen semanal, D: Días, I: Índice de flujo de lavabo de baño 154, T: Minutos de lavabo personal, N: Número de uso.

d: Fregadero o lavabo de la cocina

Se realiza el lavado de utensilios y objetos de cocina con un aproximado de tres (3) veces al día, durante toda la semana y en un periodo de 3 min. Se considera que el índice de flujo del lavabo es de 2 gpm, al respecto se tiene:

$$V(L) = N \times I(\text{gpm}) \times T(\text{min}) \times D \times 3.8(L/\text{gal}) \quad (4)$$

V: Volumen semanal, D: Días, I: Índice de flujo de lavabo de cocina, T: Minutos de uso, N: Número de uso.

Preparación del coagulante natural *Opuntia ficus indica*

Para preparar el coagulante a base de una cactácea, se revisaron investigaciones relacionadas de Martínez y Gonzáles (2012), Parra *et al.* (2011) y Villabona *et al.* (2013) quienes utilizaron diferentes especies de cactáceas para preparar el coagulante y posterior clarificación el agua. De la misma manera se tomó como guía la metodología aplicada por López (2018) donde obtuvo mejores resultados en remoción en muestras de agua a diferente nivel de turbiedad. La Figura 2 muestra el proceso de preparación y obtención del coagulante en forma de polvo, que se siguió en el presente estudio.

Asimismo, se debe precisar que las pencas de cactus *Opuntia ficus indica* se adquirieron del tunal de Corcona, en el distrito de Santa Cruz De Cocachacra, provincia de Huarochirí, departamento de Lima, ubicado a una altitud de 1254 m.s.n.m. y a la altura del kilómetro 56 de la Carretera Central.

Se debe mencionar que por cada 1 kg de penca fresca se puede obtener 8% de harina, para el caso del presente trabajo de investigación, de 6 kg de penca fresca se obtuvo 0.48 kg de harina o polvo de cactus *Opuntia ficus indica*.

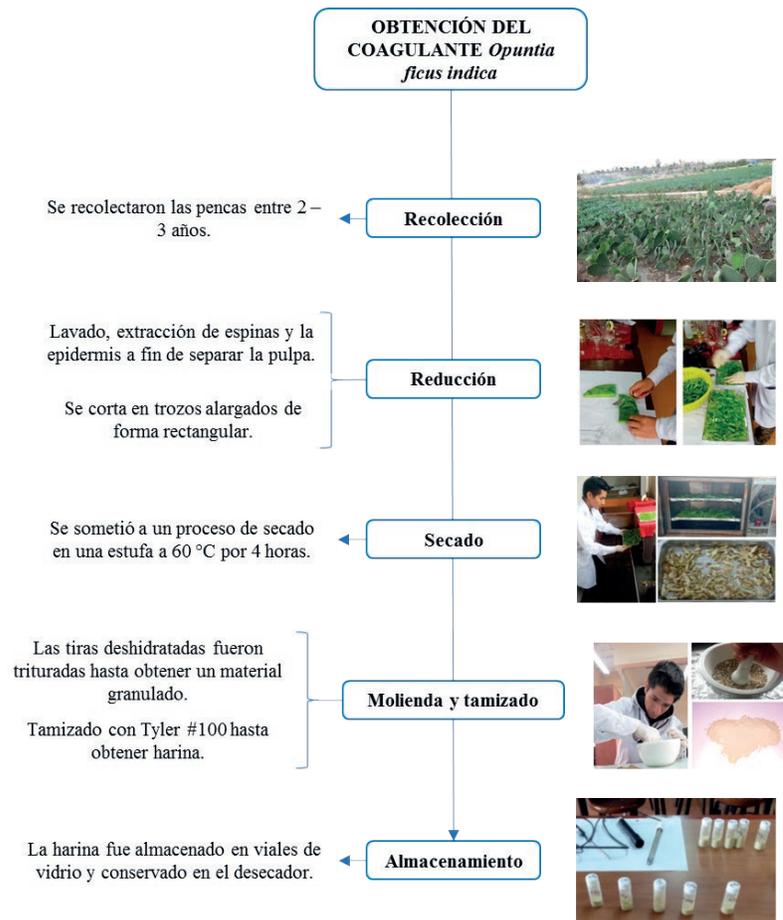


Figura 2 | Obtención del coagulante natural en forma de polvo a base de *Opuntia ficus indica*.

Dosificación del coagulante natural

Para iniciar los ensayos en el equipo de prueba de jarras se determinaron los rangos de dosis del coagulante natural, esto tomando como referencia la turbidez obtenida en la caracterización de las aguas grises, para lo cual, se prepararon diferentes dosis (g/L) de *Opuntia ficus indica*, estas dosis se adicionaron en cada jarra que contenía 1 litro de agua residual gris.

Programación y funcionamiento del equipo de la prueba de jarras

Para el funcionamiento del equipo de la prueba de jarras, se preparó 1 litro de agua gris por jarra, se programó la velocidad (rpm) y tiempo de la mezcla, para lo cual, se tomó como referencia los valores utilizados por Parra *et al.* (2011).

Puesto en marcha el equipo se inició con la homogenización de la muestra de agua gris a 50 rpm durante 10 segundos, en la siguiente etapa de mezcla rápida se añadió las diferentes cantidades de coagulante de manera simultánea, en la zona de máxima turbulencia a 100 rpm y durante 1 minuto, luego se produjo la mezcla lenta a 30 rpm durante 20 minutos y finalmente se mantiene en reposo (0 rpm).

Con equipo en reposo durante 30 minutos, se produjo la sedimentación de las partículas sobrenadantes y se procedió a extraer las muestras de cada jarra, este procedimiento se realizó con la pipeta y vertiendo en los vasos precipitados de 100 mL.

Determinación de la dosis óptima del coagulante natural

Para determinar la dosis óptima del coagulante natural, se desarrolló la metodología aplicada por López (2018) y propuesta por la CEPIS/OPS en el documento “Tratamiento de agua para consumo humano. Plantas de filtración. Manual I”, mediante la cual se ejecuta la prueba de jarras y se mide los parámetros residuales básicos, a fin de determinar con qué parámetro se obtiene la mayor remoción.

De tal forma se ejecutaron las pruebas de jarra para un solo nivel de turbidez de 625 UNT (determinado en un análisis previo a los ensayos) y la adición de diferentes masas de coagulante. Una vez finalizado el funcionamiento del equipo de la prueba de jarras y recolectados los sobrenadantes de las muestras de agua, se analizaron los parámetros fisicoquímicos, orgánicos y nutrientes tales como: Potencial de hidrógeno (pH), Sólidos Suspendidos Totales (SST), Turbidez, Demanda Bioquímica de Oxígeno (DBO_5) y Nitrito, a fin de evaluar su variación.

Evaluación de variación de parámetros

Se evaluaron y compararon los valores finales de los parámetros fisicoquímicos, orgánicos y de nutrientes obtenidos en los ensayos del equipo de prueba de jarras. Para determinar dichos parámetros se siguieron los “Métodos Estándar para el Examen de Agua y Aguas residuales”- 2005, propuesta por la Asociación Americana de Salud Pública (APHA), la Asociación Americana de Obras Hidráulicas (AWWA), y la Federación del Medio Ambiente del Agua (WEF).

Construcción de las unidades del sistema de tratamiento de Aguas Grises

Unidad de coagulación

Compuesto por 4 tanques, cada uno de 15 L de capacidad, con orificios de $3/4''$ a 3 cm y a 10 cm de la base, el primero para la salida del agua gris coagulada a la siguiente unidad y el segundo para facilitar la homogenización en los tanques; se usó 6 válvulas de paso para regular el volumen de salida en el efluente, se aseguró con contratueras de bronce y empaques de jebe para evitar fuga de agua. El caudal de ingreso es de 0.26 L/s.

Unidad de sedimentación

Conformado por un depósito rectangular de 70 L de capacidad, 19 láminas de acrílico para atrapar sólidos flotantes y resbalar por gravedad, un orificio de entrada y otra de salida de $3/4''$, por la primera ingresa el agua regulada por una válvula y la segunda facilitará la salida del agua por rebose; con dos orificios para la limpieza de la unidad y la extracción del volumen residual de agua gris. Se debe indicar que la carga hidráulica superficial a la que operó esta unidad es $24.19 \text{ m}^3/\text{m}^2/\text{día}$ y el caudal de ingreso es de 0.28 L/s.

Unidad de filtración

Integra dos cilindros cada uno de 50 L de capacidad, con medio filtrante de soporte de grava con diámetro entre 2.5 y 5.0 mm, carbón activado granulado de coco, arena gruesa con diámetro entre 0.5 y 0.8 mm y arena fina con diámetro entre 0.15 y 0.35 mm, la altura de la cama de sustrato fue de 30 cm, en la base 7.5 cm de grava con diámetro de 3 a 3.5 cm, 7.5 cm de espesor de carbón activado, 7.5 cm de arena gruesa y 7.5 cm de arena fina; se incorporó lámina de algodón por cada nivel de sustrato.

Para la adecuación del medio filtrante, se lavó el sustrato con abundante agua de forma repetitiva esto para retirar todas las impurezas y al final un enjuague con agua destilada. El caudal de ingreso es de 0.26 L/s.

Módulo automático

Modulo utilizado para la prueba a escala de laboratorio aplicando las dosis obtenidas en los ensayos de prueba de jarras, su forma automática facilita la regulación de velocidad (rpm) de las paletas agitadoras y el volumen de las muestras. Se encuentra conformado por 1 motor monofásico tipo 56 de 220 V con un anclaje mediante patas B3, velocidad de giro de 3000 rpm, con



Figura 3 | Sistema piloto de tratamiento de aguas grises.

2 polos, diámetro del eje de 9 mm y potencia máxima de 0,12 kW/0,17 cv; y 1 variador de frecuencia de 0,75 kW, modelo PT 150 mini, graduado para 300, 250, 200 y 100 rpm en la unidad de coagulación; el sistema piloto completo se observa en la Figura 3.

RESULTADOS

Determinación de los parámetros fisicoquímicos de las aguas grises domésticas antes del tratamiento

En esta etapa se determinó la calidad de las aguas residuales grises de origen doméstico *in situ*, mediante la caracterización de sus parámetros fisicoquímicos, orgánicos y de nutrientes; en la Tabla 1 se muestran los resultados.

Tabla 1 | Parámetros básicos registrados en la caracterización *in situ* de las aguas residuales grises.

Parámetros básicos	Unidades	Valores
pH	-	9.87
SST	mg/L	572
Turbidez	UNT	625
DBO ₅	mg O ₂ /L	332
Nitrito (NO ₂ ⁻)	mg NO ₂ /L	0.205

Respecto a los resultados se observa un pH relativamente alcalino, con una DBO₅ que sobrepasa los valores máximos permisibles por el Estándar de Calidad Ambiental (ECA) agua 2017 específicamente en la Categoría 3: Riego de vegetales y bebida de animales (15 mg/L).

De la misma manera los SST y turbidez, no considerados en la normativa nacional, se compararon de forma referencial con la Guía de la Agencia de Protección Ambiental EPA-2012, siendo ≤ 30 mg/L y ≤ 2 UNT respectivamente; y la Comisión Nacional del Agua (CNA) 2009, donde también se encuentran por encima de los niveles.

Parámetros Óptimos de la *Opuntia ficus indica* como Coagulante

Ejecutado los ensayos en el equipo de prueba de jarras y dónde se determinó la dosis óptima del coagulante natural en muestras de agua residual gris, con una turbidez inicial de 625 UNT y una concentración de SST de 572 mg/L, se muestran los resultados de los parámetros pH y SST en la Tabla 2.

Tabla 2 | Resultado de los parámetros fisicoquímicos al aplicar diferentes dosis del coagulante natural.

Nº Jarra	Dosis de coagulante (g/L)	pH	SST (mg/L)	Nº Jarra	Dosis de coagulante (g/L)	pH	SST (mg/L)
1	0.125	9.75	248.3	26	3.25	5.22	55.4
2	0.25	9.73	220.4	27	3.375	5.18	50.4
3	0.375	9.75	214.6	28	3.5	5.12	49.5
4	0.5	9.66	200.1	29	3.625	5.22	42.2
5	0.625	9.58	197.8	30	3.75	5.04	39.6
6	0.75	9.58	170.4	31	3.875	5.01	35.9
7	0.875	9.51	166.4	32	4	5.01	33.7
8	1	8.98	150.3	33	4.125	4.76	29.8
9	1.125	8.84	132.6	34	4.25	5.01	29.1
10	1.25	8.5	123.6	35	4.375	4.94	28.5
11	1.375	8.34	105.5	36	4.5	5	27.7
12	1.5	8.13	102.5	37	4.625	5.02	27.3
13	1.625	8.01	98.5	38	4.75	4.45	26.2
14	1.75	7.69	91.6	39	4.875	4.5	26.1
15	1.875	7.53	90.9	40	5	4.21	25.3
16	2	7.11	89.7	41	5.125	4.24	26.4
17	2.125	7.04	80.7	42	5.25	4.12	24.5
18	2.25	6.88	80.6	43	5.375	4.5	24.6
19	2.375	6.72	79.1	44	5.5	4.16	24.8
20	2.5	6.66	78.4	45	5.625	4.21	24.1
21	2.625	6.47	71.6	46	5.75	4.5	22.5
22	2.75	6.14	68.6	47	5.875	4.12	20.4
23	2.875	6.05	63.4	48	6	4.3	20.2
24	3	5.76	64.6	49	6.125	4.2	20.1
25	3.125	5.34	60.3	50	6.25	4.6	20.1

De la misma manera, se analizaron y compararon los parámetros orgánicos y de nutrientes obtenidos luego de las pruebas de jarras para el esquema de dosificación muestral (Tabla 3).

Tabla 3 | Resultado de los parámetros de carga orgánica y nutriente al aplicar diferentes dosis del coagulante natural.

Nº Jarra	Dosis de coagulante (g/L)	Turbidez (NTU)	DBO ₅ (mg O ₂ /L)	Nitrito (mg NO ₂ /L)
3	0.375	316	97.35	0.3505
8	1	433	94.7	0.4905
13	1.625	61.95	87.15	0.054
18	2.25	89.4	91.55	0.1145
23	2.875	87.75	78.1	0.0995
28	3.5	91	80.85	0.1075
33	4.125	77.65	61.2	0.0925
38	4.75	63.4	50.8	0.0505
43	5.375	59.55	57.75	0.0225
48	6	51.05	49.55	0.0225

Para el análisis de variación y comparación de resultados, se mostrarán los parámetros fisicoquímicos, orgánicos y de nutrientes involucrados en la remoción de contaminantes mediante la aplicación del coagulante natural, estos son:

Parámetros de pH

De acuerdo con los valores registrados, al agregar el coagulante natural disecado y en polvo en muestras de aguas residuales grises, se obtuvo una variación significativa del pH reduciendo de 9.75 hasta 4.12, esto se debe a la predominancia del ingrediente activo llamado ácido galacturónico en el coagulante *Opuntia ficus indica* y la existencia de grupos carboxilos a lo largo de la cadena e implica que puede darse la adsorción química entre partículas cargadas suspendidas en el agua y estos grupos funcionales; dicho comportamiento descendiente en los valores de pH e inversamente proporcional con el incremento de la dosis del coagulante, se muestra en la Figura 4.

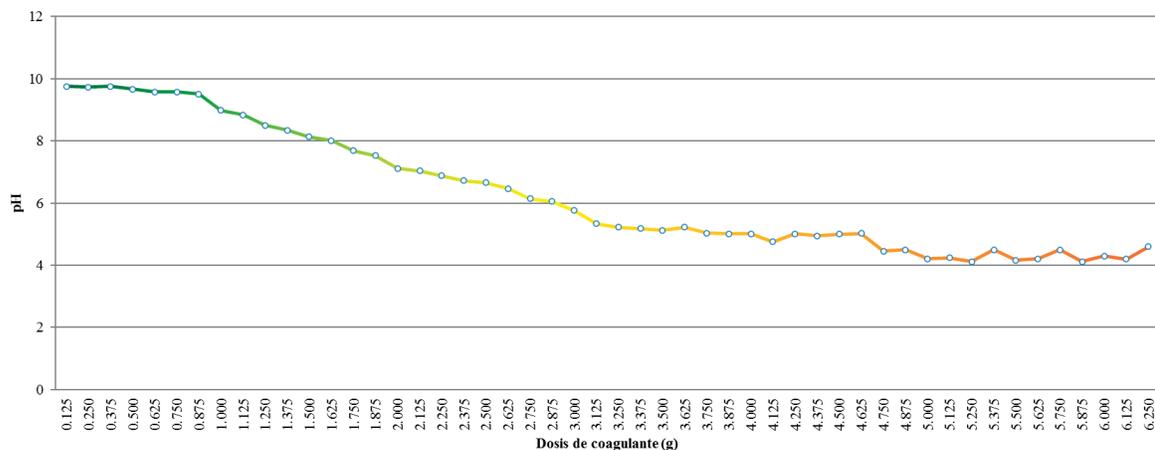


Figura 4 | Variación de valores de pH posterior a los ensayos de prueba de jarras.

Parámetros de SST

Con respecto a los SST, los resultados indican que el agua gris inicialmente posee una alta concentración de SST y que al incorporar el coagulante es posible obtener una alta remoción, de esta forma removiendo la concentración desde 248.3 hasta 20.1 mg/L. El alto porcentaje de remoción de los SST es, en efecto, el resultado de la interacción entre las partículas suspendidas y el coagulante natural *Opuntia ficus indica*; así como a las sinergias entre los mecanismos de adsorción y barrido.

La dosis de coagulante depende las características fisicoquímicas del agua a tratar, en general entre mayor es la concentración de este parámetro (SST), mayor será la dosis de coagulante *Opuntia ficus indica* a utilizar, la variación de los SST se puede apreciar en la Figura 5.



Figura 5 | Valores de SST obtenida posterior a los ensayos de prueba de jarra.

Parámetro de turbidez

En la Figura 6 se observa el comportamiento de la turbidez, esto después de realizar la prueba de jarras utilizando diferentes dosis de coagulante (g/L) *Opuntia ficus indica*, en el proceso de clarificación del agua residual gris. Inicialmente la turbidez disminuye rápidamente con (0.38 a 1.63 g/L), luego aumenta levemente (1.63 a 3.50 g/L). Esto demuestra que el coagulante natural utilizado genera un cambio en las cargas de las partículas en suspensión (lo invierte), obteniéndose una mayor cantidad de dichas partículas suspendidas. Finalmente, este parámetro muestra la tendencia a estabilizarse (3.5 a 6.0 g/L).

El mucílago de la *Opuntia ficus indica*, aplicado como coagulante, se carga positivamente en la superficie y adsorbe partículas contaminantes de cargas negativas, siendo estos en su mayoría partículas coloidales responsables de la turbidez en el agua gris.

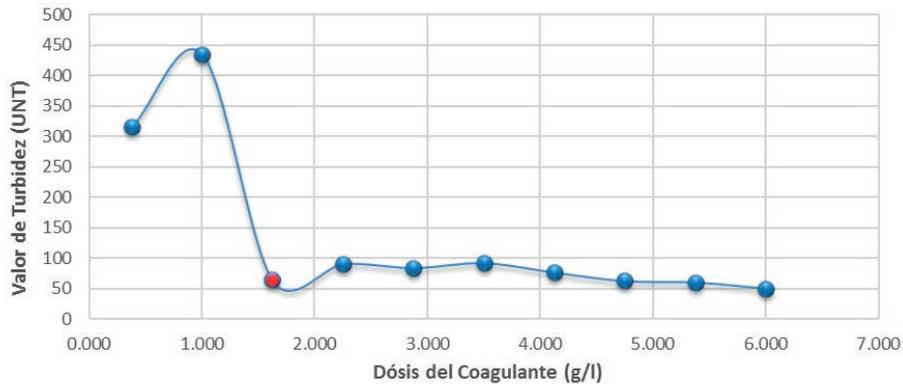


Figura 6 | Valores y comportamiento de turbidez obtenida en las pruebas de jarras.

Parámetros de demanda bioquímica de oxígeno (DBO₅)

Dado los resultados de DBO₅, se puede observar que el oxígeno requerido por los organismos en sus procesos metabólicos al consumir la materia orgánica presente en las aguas residuales grises fue disminuyendo progresivamente desde 98.4 mg/L al agregar una dosis de 0.38 g/L hasta 49.4 mg/L para una dosis de 6.0 g/L, con ligeros incrementos en 92.2, 81.6 y 58.6 mg/L.

La importancia de la medición de este parámetro radica en predecir el efecto que causaría una determinada descarga de aguas residual gris, sobre la concentración de oxígeno disuelto de un cuerpo de aguas receptor. Es decir, la capacidad de un cuerpo de agua receptor, para asimilar un determinado tipo de descarga.

En la Figura 7 se puede observar la variación de la DBO₅ con tendencia hacia la disminución, evidenciando que al agregar el coagulante natural *Opuntia ficus indica* en las muestras de agua gris, la DBO₅ experimenta una variación relativamente baja.

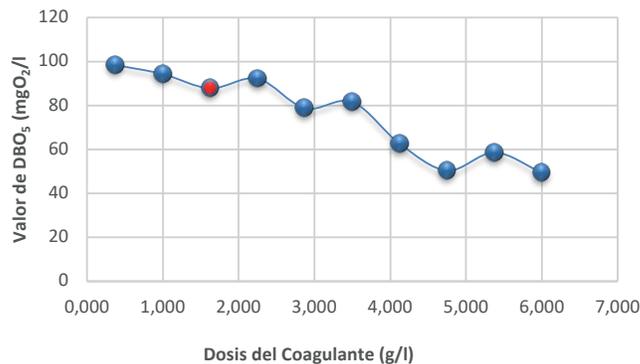


Figura 7 | Valores y comportamiento de DBO₅ obtenida luego de las pruebas de jarras.

Parámetros de nitrito

Como resultado de experimentos la concentración de nitrito (NO_2^-) fue progresivamente disminuyendo mediante la adición de coagulante. En la Figura 8 se observa el comportamiento de nitrito después de realizar la prueba de jarras utilizando *Opuntia ficus indica* en diferentes dosis, agregadas como coagulante al proceso de clarificación del agua residual gris. Inicialmente el nitrito disminuye rápidamente para las diferentes dosis de coagulante (0.38 a 1.63 g/L), luego aumenta levemente (1.63 a 2.25 g/L); para finalmente el parámetro muestra una tendencia a estabilizarse (2.25 a 6.0 g/L), lo mencionado puede observarse en la Figura 8.

Fue necesario el análisis de este parámetro al considerarse uno de los más tóxicos para organismos acuáticos y animales por presentarse con mayor concentración que el ácido nitroso (Camargo y Alonso, 2007).

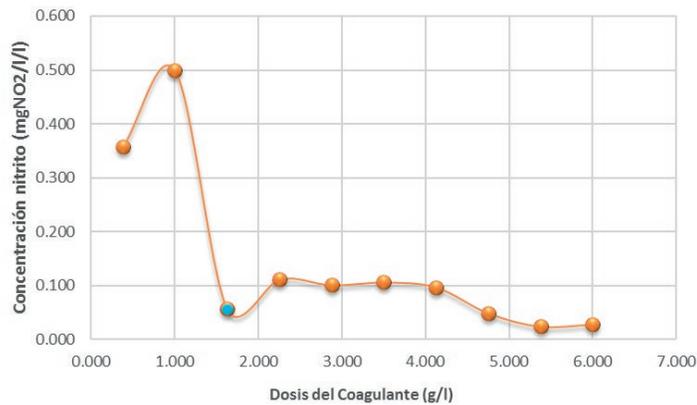


Figura 8 | Valores de nitrito obtenida posterior a los ensayos de prueba de jarra.

Comprobación estadística de los resultados y la determinación de la dosis óptima

En cuanto a la validez estadística para las pruebas de jarras realizadas y donde se alcanzó un comportamiento óptimo de los parámetros, se siguió una serie de premisas, las cuales consistieron en establecer la hipótesis para validar la distribución de los datos mediante la prueba de normalidad (Shapiro – Wilk) y mediante la prueba ANOVA para validar la diferencia entre las medias de los parámetros obtenidos para diferentes dosis de coagulante.

Hipótesis para validar la distribución de los datos

H_0 : Los datos de las variables siguen una distribución normal

H_a : Los datos de las variables no siguen una distribución normal

El criterio de aceptación de la hipótesis nula (H_0) obedece a si la significancia (Sig.) > 0.01, de lo contrario, se rechaza esta hipótesis y se acepta la hipótesis alternativa. De esta manera, en la Tabla 4 se observa un valor de significancia (Sig.) > 0.01, para el caso de Shapiro – Wilk (menos de 50 muestras) por lo cual se acepta la hipótesis nula y los datos siguen una distribución normal.

Tabla 4 | Prueba de normalidad de los datos de las variables.

	Pruebas de normalidad					
	Kolmogorov-Smirnov ^a			Shapiro-Wilk		
	Estadístico	gl	Sig.	Estadístico	gl	Sig.
Dosis (g)	0.084	14	0.200*	0.965	14	0.796
pH	0.270	14	0.007	0.846	14	0.020

*Esto es un límite inferior de la significación verdadera.

^aCorrección de significación de Lilliefors. Nota: Tomado de SPSS.

Hipótesis para validar la diferencia entre las medias

Previo al análisis de las diferencias entre las medias se debe indicar que se realizaron tres repeticiones en los ensayos para luego ser analizados en el laboratorio.

H_0 : Existen diferencias significativas en el valor medio del parámetro (físicoquímicos y orgánicos) para las distintas dosis de coagulante natural aplicadas según las pruebas de jarras.

H_a : No existen diferencias significativas en el valor medio del parámetro (físicoquímicos y orgánicos) para las distintas dosis de coagulante natural aplicadas según las pruebas de jarras.

El criterio para aceptar la hipótesis alternativa (H_a) se basa en que, la Sig.<0.05, de lo contrario se rechaza esta hipótesis y se acepta la hipótesis nula, lo que indica que no existen diferencias significativas en el parámetro evaluado para las dosis de coagulante aplicadas (Tabla 5).

Tabla 5 | Prueba ANOVA para el parámetro turbidez.

ANOVA Turbidez (NTU)					
	Suma de cuadrados	gl	Media cuadrática	F	Sig.
Entre grupos	223213.806	4	55803.451	6377.537	0.000
Dentro de grupos	43.750	5	8.750		
Total	223257.556	9			

Nota: Tomado de SPSS.

Es así que la dosis óptima de coagulante observado en el sedimentador, dónde se hace posible la desestabilización de partículas coloidales y los sólidos suspendidos en el agua gris que esta siendo tratada se produzca de una manera más rápida y al mismo tiempo contribuye con la obtención de un flóculo de mayor tamaño y mayor compactación lo cual trae como consecuencia una sedimentación más efectiva y en menor tiempo, es de 1.625 g/L.

Tabla 6 | Dosis óptima del coagulante natural *Opuntia ficus indica* – parámetros físicoquímicos, carga orgánica y de nutrientes.

Prueba	Jarra	Dosis Coagulante (g)	pH	SST (mg/l)	Turbidez (NTU)	DBO5 (mg O ₂ /L)	Nitrito (NO ₂ mg/L)
Caracterización (inicial)	-	0.000	9.87	572.33	625	332.33	0.21
3	13	1.625	8.01	98.5	61.95	87.15	0.056
% Variación			19%	83%	90%	74%	73%

Determinación de los parámetros físicoquímicos de las aguas grises domésticas tratados en el sistema piloto

En esta etapa se aplicó el coagulante óptimo de *Opuntia ficus indica* para tratar 60 litros de agua en el sistema piloto, a un Tiempo de Retención Hidráulico de 6 horas y determinar la calidad del agua gris a la entrada y salida del sistema, en la Tabla 7 se muestra los resultados obtenidos.

Tabla 7 | Parámetros físicoquímicos de entrada y salida del sistema.

Parámetros	Entrada	Salida	% Variación	ECA (Categoría 3)	EPA
pH	9.91	6.9	30.37	6.5–8.4	6–9
SST (mg/l)	610	20.3	96.67	-	≤30
Turbidez (NTU)	662	78.2	88.19	-	≤2
DBO ₅ (mgO ₂ /L)	497	134.3	72.98	15	≤10
Nitrito (mgNO ₂ /L)	0.32	0.087	72.81	10	-

Sin embargo, sólo algunos parámetros como el pH y nitrito cumplen con los rangos establecidos por el ECA para Agua. D.S N° 004-2017 para la categoría 3: Riego de vegetales y bebida de animales Subcategoría D1: Riego de vegetales (Agua para riego no restringido). Así mismo para otros parámetros se tomó como referencia a la Guía de la Agencia de Protección Ambiental (EPA) – 2012 para la reutilización de aguas residuales para la agricultura.

Diseño e implementación de un sistema de tratamiento de aguas residuales domésticas grises a una escala de prueba

Se logró estimar la cantidad de aguas grises que produce cada fuente elegida para la recolección de aguas grises (lavadora, fregadero, lavabo y ducha), mediante la “Estimado de los flujos de aguas grises” del Manual de diseño para manejo de aguas grises para riego exterior (Allen, 2015), en una vivienda de cinco habitantes, como se logra observar en la Tabla 8.

Tabla 8 | Resumen de estimación de gastos de agua en una vivienda de 5 habitantes por día.

Actividad	Cálculo	Valor	Unidad
Lavado de ropa a lavadora	=5×26 gal×3.8 (L/gal)	449	l/Semana
Ducha (15 minutos).	=3×1.5 gpm×15 min×5×3.8 (L/gal) =2×1.5 gpm×15 min×5×3.8 (L/gal)	1 282 513	l/Semana
Lavabo de baño (lavado de manos, higiene bucal)	=15×2 gpm×1 min×7×3.8 (L/gal)	798	l/Semana
Lavabo de cocina (Lavado de utensilios y cocción de alimentos)	=3×2 gpm×3 min×7×3.8 (L/gal)	478.8	l/Semana
Total		3520.8	l/Semana

DISCUSIÓN

Los resultados obtenidos se comparan con los de López (2018), cuyo objetivo fue evaluar la eficiencia de *Opuntia ficus indica* como coagulante para remover la turbiedad presente en las muestras de agua sintética con 20, 50, 100, 300 y 500 UNT. Obteniendo un rango de remoción de turbiedad del 58 a 86% con dosis óptimas de 0.03, 0.045, 0.055, 0.075 y 0.090 g/L, respectivamente; el pH óptimo 9 para todos los niveles de turbiedad; mientras que en el presente estudio la turbiedad inicial es de 625 UNT, la dosis óptima es de 1.625 g/L, el pH óptimo es de 8.1 y la turbiedad óptima es de 61.95 UNT con una remoción del 90%.

Asimismo los resultados también son similares a los presentados por Villabona *et al.* (2013), que en su objetivo de caracterizar la *Opuntia ficus-indica* y el propósito de determinar su potencial para remover la turbidez, color y pH; pudo evaluar el poder coagulante para una dosis de 0.09 g/L donde obtuvo una remoción de 72% para turbidez, demostrando la remoción efectiva, en comparación con lo obtenido en el presente trabajo 90%; en caso del pH se mantuvo alcalino entre 7.5 y 7.9 parecido a los valores obtenidos para la presente estudio, el cual varió de 9.87 a 8.01 manteniéndose en la escala alcalina y una dosis óptima de 1.625 g/L.

Por su parte, los aportes de Silva (2017), se centran en los resultados de remoción de turbidez de aguas sintéticas turbias en función de las concentraciones de mucilago, que, a diferencia de la presente investigación, aplicó 2 concentraciones de 0.03 y 0.05 g/L para una turbidez inicial de 500 y 1000 NTU, con las cuales obtuvo una remoción máxima entre 86% y 88.9%. Sin embargo, los resultados obtenidos, se asemejan a los obtenidos en este estudio donde se encontró la máxima remoción de 90% para una turbidez inicial de 625 NTU y una dosis de 1.625 g/L de coagulante. Igualmente, se determinó la significancia de estos dos parámetros estadísticamente mediante los programas Minitab e Infostat, a diferencia del presente estudio, el cual empleó el SPSS de IBM. No obstante, en ambas investigaciones se demostró la validez de los resultados para una significancia de 0.05%, es decir, para un nivel de confianza del 95%.

CONCLUSIÓN

Se estableció que la dosis adecuada de *Opuntia ficus indica* donde se hace posible la desestabilización de partículas coloidales y los sólidos suspendidos logran agruparse de una manera más rápida formando flóculos para luego precipitar es de 1.625 g/L, comprobando la validez de los resultados mediante la estadística ANOVA a un nivel de confianza de 95% y la significancia menor a 0.05 en cada parámetro. Para la prueba a escala de laboratorio, se logró implementar un sistema de tratamiento, a través del cual se determinó la calidad del agua gris antes y después de aplicar el coagulante natural, los mejores resultados de remoción obtenidos fueron 96.67% de SST, 88.19% de turbidez, 72.98% de DBO₅ y 72.81% de Nitrito.

Los coagulantes naturales son una excelente opción para la remoción de contaminantes de alta carga orgánica y de turbidez, siendo su aplicación una buena alternativa en el tratamiento primario, replicar su uso a gran escala como un insumo alternativo en instituciones públicas y privadas, en los gobiernos Regionales y Locales que administran grandes extensiones de áreas verdes, así también en zonas urbanas y rurales con baja disponibilidad de agua; de esta forma contribuir en la mejora de la calidad de vida de las personas. Se propone un insumo natural de origen vegetal capaz de contribuir en la mejora de la calidad del agua, evite daños a la salud como el mal de alzheimer, enfermedades neurodegenerativas o el cáncer; su adquisición sea a bajo costo, se dispone su fácil acceso y sobre todo que es una propuesta amigable con el medio ambiente, como el aprovechamiento de los subproductos de la extracción del mucílago de la *Opuntia ficus indica* y la disposición de lodos generados como abono orgánico que serán objeto de futuras investigaciones.

AGRADECIMIENTO

Los autores agradecen a la Universidad Nacional Federico Villarreal por financiar la investigación mediante la Resolución Rectoral N° 3478-2018-UNFV, así mismo se desea agradecer de forma especial el apoyo recibido por el Instituto Especializado de Investigación y Gestión del Agua y a su fundador Dr. Jhon Walter Gómez Lora.

REFERENCIAS

- Allen, L. 2015. *Manual de diseño para manejo de aguas grises para riego exterior*. Estados Unidos: Greywater action. Versión 2.: Greywater action. Versión 2.
- Andia, Y. 2000. *Evaluación de Plantas y Desarrollo Tecnológico. Tratamiento de Agua: Coagulación Floculación*. Lima, Perú: SEDAPAL.
- Asociación Americana de Salud Pública (APHA), Asociación Americana de Obras Hidráulicas (AWWA) y Federación del Medio Ambiente del Agua (WEF). 2005. *Métodos Estándar para el Examen de Agua y Aguas residuales*. 21th Edition. Centennial Edition, Washintong D.C.
- Camargo J.A., Alonso A. 2007. *Contaminación de nitrógeno inorgánico en los sistemas acuáticos: problemas medioambientales, criterios de calidad de agua, e implicaciones del cambio climático*. Universidad de Alcalá. Madrid, España.
- Collacci, A. 2018. *La situación de las aguas residuales en Lima*. Lima, Perú: PuntoEdu, Pontificia Universidad Católica del Perú.
- Comisión Nacional del Agua (CNA). 2009. *Normas Oficiales Mexicanas*. Mexico.
- Franco M.V. 2007. *Tratamiento y reutilización de aguas grises con aplicación a caso en Chile*. Santiago, Chile: Universidad de Chile, Santiago de Chile, Facultad de Ciencias Físicas y Matemática.
- Gual Frau, M. 2005. *Reutilización de aguas grises para la descarga de inodoros. Aspectos químicos relacionados*. España: Universitat de les Illes Balears, Facultad de Ciencias.

- Guía de la Agencia de Protección Ambiental-EPA 2012. *Para la reutilización de aguas residuales para la agricultura. Transcripción y edición de ponencia ofrecida bajo el panel Retos que conlleva la reutilización de aguas residuales en la agricultura*. San Juan, Puerto Rico.
- Jenssen P., Vrale L. 2003. *Tratamiento de Aguas Grises Combinando Bio-filtros y Humedales de Tratamiento en Clima Frío*. Noruega: Obtenido de: <http://www2.gtz.de/ecosan/download/ecosan-symposium-Luebek-sesion-2-esp-pdf>.
- López Pérez, M. 2018. *Evaluación del uso de la cactácea Opuntia ficus indica como coagulante natural para el tratamiento de aguas*. Lima, Perú: Universidad Nacional Agraria la Molina.
- Loza Cornejo, S., Terrazas, T., López Mata, L. 2012. *ruit, seeds and germination in five species of globose cactaeae*. Interciencia.
- Martínez García, J., Gonzáles Silgado, L. 2012. *Evaluación del poder coagulante de la tuna (Opuntia ficus indica) para la remoción de turbidez y color en aguas crudas*. Colombia: Universidad de Cartagena, Facultad de Ingeniería Química.
- Ministerio del Ambiente. 2017. Artículo 3 de los Estándares de Calidad Ambiental (ECA) para agua. D.S. N° 0004-2017. Lima, Perú.
- Niño Rodríguez, E., Martínez Medina, N. 2013. *Estudio de las aguas grises domésticas en tres niveles socioeconómicas de la ciudad de Bogotá*. Bogotá, Colombia: Pontificia Universidad Javeriana.Facultad de Ingeniería Civil.
- Parra, Y., Cedeño, M., García, M., Mendoza, I., Gonzáles, Y., Fuentes, L. 2011. *Clarificación de aguas de alta turbidez empleando el mucílago de Opuntia wentiana (britton y rose) / (cactaceae)*. Venezuela: Universidad del Zulia, Laboratorio de Investigaciones Ambientales.
- Programa de las Naciones Unidas para el Desarrollo (PNUD). 2006. *Informe sobre Desarrollo Humano. Mas allá de la escasez: Poder, pobreza y la crisis mundial del agua*. Madrid, Barcelona, México, Nueva York: Programa de las Naciones Unidas para el Desarrollo, Mundi-Prensa.
- Quispe Jiménez, H.G. 2012. *Aplicación del mucílago extraído de nopal (Opuntia ficus indica) en la clarificación del agua del río Uchusuma*. Tacna, Perú: Universidad Nacional Jorge Basadre Grohmann.
- Sepulveda, J., Graham, B. 2007. *Aerobic metabolic rates of swimming juvenile mako sharks, Isurus oxyrinchus*. Mar Biol. <https://doi.org/10.1007/s00227-007-0757-2>
- Silva Casas, M. 2017. *Extracción del mucílago de la penca de tuna y su aplicación en el proceso de coagulación-floculación de aguas turbias*. Lima, Perú.
- Villabona Ortiz, Á., Paz Astudillo, I. C., y Martínez García, J. 2013. *Caracterización de la Opuntia ficus indica para su uso como coagulante natural*. Colombia: Universidad de Cartagena, Sede Piedra de Bolívar.
- World Health Organization, W. 2006. *Safe Use of Wastewater, Excreta and Greywater. Volumen IV: Excreta and Greywater use in Agriculture*. Francia: United Nations Environment Programme.