

FITORREMEDIACIÓN DE AGUAS RESIDUALES DOMÉSTICAS EN MOQUEGUA

Yajaira Balmi Coayla Mamani^{1a} Fidel Jesús Ayca Castro^{2b} Edgar Bedoya Justo^{3c} Teodoro Huarhua Chipani^{4d}

RESUMEN

Este trabajo se desarrolló en el Valle de Moquegua, en la Asociación Reforestación Omo, con el objetivo evaluar la capacidad de fitodepuración de las aguas residuales provenientes de la «Planta de tratamiento de aguas residuales» PTAR OMO (efluente), mediante un sistema de tratamiento hecho de plantas de junco, instalados con apoyo de una estructura que los convierte en flotantes. La evaluación del agua residual sometida a tratamiento se realizó en el efluente del sistema de fitodepuración a los tres, seis y nueve días desde la adecuación de las plantas; asimismo, para el análisis de datos se utilizó un diseño completamente al azar, con un análisis de varianza (ANOVA) y una prueba de hipótesis de Tukey. El sistema de tratamiento presentó mayor eficiencia a los nueve días de retención para los parámetros de sólidos totales en suspensión (STS) con valores de 51 mg/L, y demanda bioquímica de oxígeno (DBO₅) con valores de 52 mg/L y para el parámetro de potencial de hidrógeno (pH) los valores fueron muy homogéneos.

Palabras clave: Filtro de macrófitas en flotación; Fitorremediación; Agua residual.

PHYTOREMEDIATION OF DOMESTIC WASTEWATER IN MOQUEGUA

ABSTRACT

This research work called "Phytoremediation of domestic wastewater in Moquegua", was developed in the Moquegua Valley, in the Omo Reforestation Association, with the objective of evaluating the phytodepuration capacity of the wastewater from the "Water Treatment Plant" residual "PTAR OMO (effluent), through, a treatment system, made of Junco plants, installed with the support of a structure that makes them floating. The evaluation of the residual water submitted to treatment was carried out in the effluent of the phytodepuration system at three, six and nine days after the adaptation of the plants. Likewise, a completely randomized design was used to analyze the data. Analysis of Variance (ANOVA) and a hypothesis test of Tukey. The treatment system showed greater efficiency at nine days of retention for the parameters of total suspended solids (STS) with values of 51 mg/L, and biochemical oxygen demand (BOD₅) with values of 52 mg/L and for the parameter of hydrogen potential (pH) values were very homogeneous.

Key words: Filter of macrophytes in flotation; Phytoremediation; Residual water.

¹ Escuela Profesional de Ingeniería Ambiental. Facultad de Ingeniería y Arquitectura. Universidad José Carlos Mariátegui Moquegua, Perú.

^a Bachiller en Ingeniería Ambiental

² Escuela Profesional de Ingeniería Ambiental. Facultad de Ingeniería y Arquitectura. Universidad José Carlos Mariátegui Moquegua, Perú

^b Docente universitario (Asesor de Tesis).

³ Escuela Profesional de Ingeniería Ambiental. Facultad de Ingeniería y Arquitectura. Universidad José Carlos Mariátegui Moquegua, Perú.

^c Docente universidad

⁴ Escuela de posgrado. Maestría en ingeniería ambiental. Universidad José Carlos Mariátegui Moquegua, Perú

^d Asesor de Tesis

INTRODUCCIÓN

El acelerado crecimiento de la población y urbanización del país, explican el aumento en la generación de aguas residuales; a esta realidad se suma la deficiencia en los procesos de tratamiento ya que solo el 14% de las plantas de tratamiento de agua residual cumplen con la normatividad vigente que indica el buen funcionamiento de las mismas ⁽¹⁾. Por otra parte, el 70% de las aguas residuales en Latinoamérica no son tratadas, y en el Perú el 70% de las aguas residuales generadas no tienen ningún tipo de tratamiento, lo cual genera efectos perjudiciales en el cuerpo receptor ⁽¹⁾.

Si bien es cierto, el tratamiento de aguas residuales es trascendental para su reutilización, realizar la construcción de una PTAR para 1 millón de habitantes y que realice un tratamiento eficiente requiere invertir US\$ 100 millones, descontando los gastos generados por el funcionamiento continuo y el mantenimiento realizado ⁽²⁾. De este modo, se propone emplear sistemas de tratamiento naturales que mejoren la calidad de las aguas residuales tratadas por un sistema de tratamiento convencional, los cuales requieren una menor inversión de capital, con resultados igualmente eficientes.

El propósito de esta investigación es demostrar un tratamiento eficiente de las aguas residuales, mediante el uso del sistema de filtro de macrofitas en flotación (FMF) de junco, como sistema de tratamiento natural, el cual resulta bastante amigable con el ambiente, requiere un bajo costo de construcción y mantenimiento, además de ser sostenible, ya que, la generación de biomasa puede ser empleada para la producción de compostaje (abono orgánico) o para la elaboración de materiales de construcción y artesanías.

MATERIALES Y MÉTODOS

La investigación es de tipo experimental, ya que se manipuló los tratamientos de la variable independiente, y se sometió a las aguas residuales mediante el sistema de FMF de junco de depuración para medir el nivel de tratamiento alcanzado.

El procedimiento de la investigación se realizó con la construcción del sistema de tratamiento, mediante

la excavación, compactación e impermeabilización con geomembrana; luego se realizó la instalación de la especie *Typha angustifolia* (junco) y el agua residual. Asimismo, se evaluó la calidad inicial del agua residual como afluente y la calidad del agua residual como efluente después de ser sometida a tratamiento, a los tres, seis y nueve días de retención, con tres repeticiones de cada una.

Población

Como población tenemos a todas las aguas residuales municipales tratadas de la PTAR OMO, las cuales son evacuadas como afluente de la PTAR, con un caudal de 125 L/s.

Muestra

Como muestra tenemos 496 L de aguas residuales, captadas y homogenizadas del mismo efluente de la PTAR OMO, en horas de máxima y mínima descarga, a través de un sistema de tuberías de seis pulgadas, instaladas por la Asociación Reforestación Omo del valle de Moquegua.

Recolección de muestras

La recolección de muestras para la evaluación de los parámetros físico y químicos, se hizo siguiendo el protocolo de monitoreo de la calidad de los efluentes de las plantas de tratamiento de aguas residuales domésticas o municipales ⁽³⁾.

Procedimiento para la recolección de muestras:

- Se seleccionaron los puntos de muestreo.
- Se midió el caudal del efluente, empleando el método volumétrico, con la ayuda de un balde plástico graduado de 10 L y un cronómetro, los datos obtenidos (8 L y 18 s) se reemplazaron en la siguiente ecuación:

$$Q = V/T$$

Donde:

Q = Caudal en L/s

V = Volumen en litros = 8 L

T = Tiempo en segundos = 18 s

Reemplazando en la fórmula, el caudal hallado fue de 0,44 L/s.

- Se etiquetaron y rotularon los envases de las muestras recolectadas.
- Se dejó correr el agua durante dos minutos aproximadamente.
- Se evitó coger el envase por la boca.
- Se enjuagó los envases tres veces con la muestra.
- Se tomó 1 000 mL de muestra para DBO5 y STS.
- Se tomó 50 mL de muestra para pH.
- Se colocaron las muestras en el cooler con ice pack, asegurando una temperatura de 4 °C para el DBO5 y los STS.
- Se llenó la Cadena de custodia otorgada por el Laboratorio San Agustín de Torata.
- Se realizó el transporte de muestras hacia el laboratorio.

Análisis de laboratorio

Luego de someter el agua residual a tratamiento, se evaluaron los parámetros de pH, STS y DBO5, en el «Laboratorio San Agustín de Torata» el cual cuenta con acreditación de sus ensayos según el Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater, APHA – AWWA – WEF 22nd Edition.

- Demanda bioquímica de oxígeno (DBO5).- SMEWW-APHA-AWWA-WEF SM 5210B Biochemical Oxygen Demand, 5 Days.

- Sólidos totales en suspensión (STS).-SMEWW-APHA-AWWA-WEF SM 2540 D Total Suspended Solids Dried at 103-105 °C.
- Potencial de hidrógeno (pH).- SMEWW-APHA-AWWA-WEF Part 4500-H+ B, 22nd Ed. pH Value. Electrometric Method

Los datos obtenidos en las tres repeticiones con y sin tratamiento fueron comparados entre sí, y con los límites máximos permisibles para los efluentes de plantas de tratamiento de aguas residuales domésticas o municipales aprobado por el DS 003-2010-MINAM.

RESULTADOS

Los resultados obtenidos, del análisis estadístico realizado son los siguientes:

Tabla 1 Resultados del parámetro de sólidos totales en suspensión – STS en el efluente

		Tratamientos (días)			
		t ₁ = 0	t ₂ = 3	t ₃ = 6	t ₄ = 9
Repeticiones	R ₁	79	225	65	52
	R ₂	81	211	61	50
	R ₃	80	218	63	51

Nota: R1 = primera repetición, R₂ = segunda repetición, R₃ = tercera repetición. t₁ = primer tratamiento a los cero días, t₂ = segundo tratamiento a los tres días, t₃ = tercer tratamiento a los seis días y t₄ = cuarto tratamiento a los nueve días.

Tabla 2 Análisis de varianza para sólidos totales en suspensión – SST (mg/L).

F de V	GL	SC	CM	FC	FT		Sig.
					0,05	0,01	
Tratamientos	3	54 174,0	18 058,0	1 313,31	4,08	7,59	**
Error	8	110,0	13,75				
Total	11	54 284,0					

Nota: CV: 3,60 % y * * (altamente significativo)

En la Tabla 2 podemos apreciar el análisis de varianza para los resultados del parámetro de sólidos

totales en suspensión del efluente del sistema de tratamiento de aguas residuales, el cual nos resulta

altamente significativo, es decir, los promedios son altamente significativos, donde los efectos resultan estadísticamente diferentes. Asimismo, el coeficiente de variabilidad de 3,60% es aceptable para la experiencia, ubicándose dentro de los rangos establecidos para experimentos ⁽⁴⁾.

Asimismo, rechazamos la hipótesis nula (Ho) y aceptamos la hipótesis alterna (Ha).

Tabla 3 Prueba de significación de Tukey ($\alpha=0,05$) para el parámetro de sólidos totales en suspensión

N.º	Tratamiento	Promedio (mg/L)	Sig.	OM
1	T4: Tiempo nueve días	51,0	a	1 ^{er}
2	T3: Tiempo seis días	63,0	b	2 ^{do}
3	T1: Tiempo cero días	80,0	c	3 ^{er}
4	T2: Tiempo tres días	218,0	d	4 ^{to}

En la Tabla 3 se aprecian los resultados de la prueba de significación de Tukey para el parámetro de sólidos totales en suspensión - SST (mg/L), del cual podemos afirmar que, existe diferencia significativa al 95% de probabilidad, siendo el mejor promedio T4: tiempo de nueve días con 51,0 mg/L, seguido del T3: tiempo de seis días con 63,0 mg/L, quedando el último lugar el T2: tiempo de tres días con 218,00 mg/L, con respecto al T1: tiempo de cero días con 80,00 mg/L.

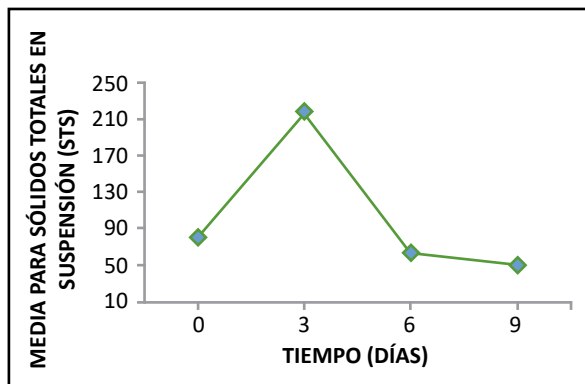


Figura 1. Media de sólidos totales en suspensión - SST (mg/L).

En la Figura 1 se muestra la media para SST (mg/L), y observamos que en el periodo de nueve días con

51,00 mg/L, el junco tiene la mayor capacidad de fitodepuración de aguas residuales, seguido del tiempo de seis días con 63,00 mg/L, quedando en último lugar el tiempo de tres días con 218,00 mg/L, respecto al tiempo de cero días con 80,00 mg/L.

Tabla 4. Resultados del parámetro de la DBO₅ en el efluente

		Tratamientos (días)			
		t ₁ = 0	t ₂ = 3	t ₃ = 6	t ₄ = 9
Repeticiones	R ₁	150	93	63	54
	R ₂	152	95	61	50
	R ₃	151	94	59	52

Nota: R1 = primera repetición, R2 = segunda repetición, R3 = tercera repetición. t1 = primer tratamiento a los cero días, t2 = segundo tratamiento a los tres días, t3 = tercer tratamiento a los seis días y t4 = cuarto tratamiento a los nueve días.

Tabla 5. Análisis de varianza para la DBO₅

F de V	GL	SC	CM	FC	FT		Sig.
					0,05	0,01	
Tratamientos	3	17 894,3	59 64,75	3 408,43	4,08	7,59	**
Error	8	14,0	1,75				
Total	11	17 908,3					

Nota: CV = 1,47 % y ** = altamente significativo

En la Tabla 5 podemos apreciar el análisis de varianza realizado para el parámetro de la DBO₅, analizado en la evaluación de la capacidad de fitodepuración de las aguas residuales mediante, FMF, usando el junco, el cual resulta altamente significativo, es decir, que los promedios son altamente significativos donde sus efectos fueron estadísticamente diferentes. El coeficiente de variabilidad de 1,47% es aceptable para el experimento y está dentro de los rangos establecidos para experimentos ⁽⁴⁾.

Asimismo, rechazamos la hipótesis nula (Ho) y aceptamos la hipótesis alterna (Ha).

Tabla 6. Prueba de significación de Tukey ($\alpha=0,05$) de la DBO_5

N.º	Tratamiento	Promedio (mg/L)	Sig.	OM
1	T4: Tiempo nueve días	52,00	a	1 ^{er}
2	T3: Tiempo seis días	62,00	b	2 ^{do}
3	T2: Tiempo tres días	94,00	c	3 ^{er}
4	T1: Tiempo cero días	151,00	d	4 ^{to}

Como se observa en los resultados de la prueba de significación de Tukey en la Tabla 6 de la DBO_5 , para determinar la capacidad de fitodepuración de aguas residuales, mediante FMF usando el junco, muestra una diferencia significativa al 95 % de probabilidad, siendo el mejor promedio T4: tiempo de nueve días con 52, 00 mg/L, seguido del T3: tiempo de seis días con 62, 00 mg/L, quedando el tercer lugar el T2: tiempo de tres días con 94, 00 mg/L, respecto al T1: tiempo de cero días con 151, 00 mg/L.

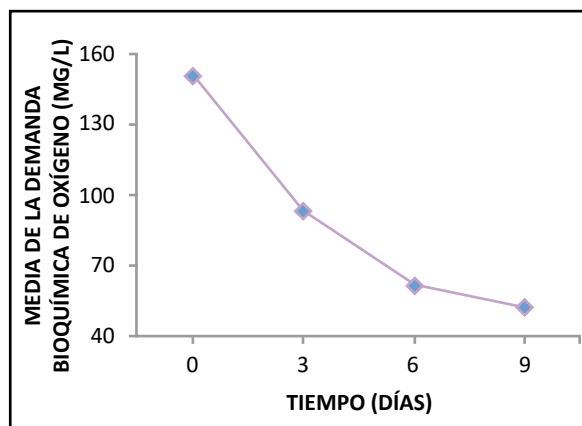


Figura 2. Media de la DBO_5

En la Figura 2 de la DBO_5 (mg/L) se puede observar que, para el tiempo de nueve días con 52 mg/L, el junco tiene la mayor capacidad de fitodepuración de aguas residuales, seguido del tiempo de seis días con 62 mg/L, quedando en tercer lugar el tiempo de tres días con 94 mg/L, respecto al tiempo de cero días con 151 mg/L.

Tabla 7. Resultados del parámetro de pH en el efluente.

		Tratamientos (Días)			
		$t_1 = 0$	$t_2 = 3$	$t_3 = 6$	$t_4 = 9$
Repeticiones	R_1	7,7	7,4	7,4	7,5
	R_2	7,5	7,4	7,6	7,5
	R_3	7,6	7,4	7,5	7,5

Nota: R_1 = primera repetición, R_2 = segunda repetición, R_3 = tercera repetición. t_1 = primer tratamiento a los cero días, t_2 = segundo tratamiento a los tres días, t_3 = tercer tratamiento a los seis días y t_4 = cuarto tratamiento a los nueve días.

Tabla 8. Análisis de varianza de potencial de hidrógeno pH

F de V	GL	SC	CM	FC	FT		Sig.
					0,05	0,01	
Tratamientos	3	0,06	0,02	4,00	4,08	7,59	NS
Error	8	0,04	0,005				
Total	11	0,1					

Nota: CV: 0,94 % y NS (no significativo)

En la Tabla 8 el análisis de varianza del potencial de hidrogeno pH resultó no significativo, es decir, que los promedios fueron estadísticamente iguales. El coeficiente de variabilidad de 0,94% es aceptable para el experimento y está dentro de los rangos establecidos ⁽⁵⁾.

Asimismo, rechazamos la hipótesis alterna (H_a) y aceptamos la hipótesis nula (H_0).



Figura 3. Media del pH (unidad de concentración de iones de hidrógeno).

En la Figura 3 para pH, se puede observar que el junco tiene una mejor eficiencia en el T2: tiempo de 3 días, ya que, se consigue alcanzar un pH más neutro con 7,4 unidades de pH, seguido del T3: tiempo de seis días con 7,5 unidades de pH, y el T4: tiempo de 3 días con 7,5 unidades de pH, los cuales resultaron ligeramente alcalinos, respecto al T1: tiempo de 0 días el pH fue aun más alcalino con 7,6 unidades de concentración de iones de hidrógeno.

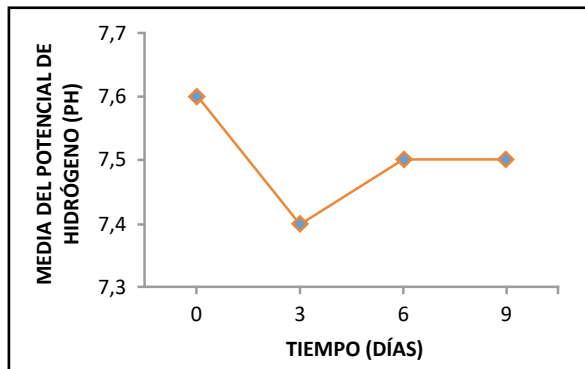


Figura 4. a. Instalación del sistema de tratamiento con junco, b. Plantas de junco a los 12 días de instalación, c. Plantas de junco a los 22 días de instalación y d. Plantas de junco a los 45 días de instalación.

DISCUSIÓN

Luego de la experimentación y análisis de los parámetros evaluados a la salida del sistema de tratamiento (efluente), se puede afirmar que, en un tiempo de retención de tres días, para el parámetro de STS, se obtuvieron valores mucho mayores a los obtenidos en un tiempo cero (218 a 80 mg/L, respectivamente), lo cual indica que, en los tres primeros días, no es posible remover STS satisfactoriamente. Este suceso podría explicarse debido a que los STS a la salida de las lagunas facultativas (efluente) suelen estar conformados por gran cantidad de microalgas que escapan del sistema de tratamiento convencional; asimismo, estas, al llegar al sistema de tratamiento propuesto, inician la fase de crecimiento exponencial debido a las condiciones óptimas de temperatura inicial ⁽⁶⁾. Asimismo, una de las propiedades de las macrofitas es impedir el desarrollo de las microalgas mediante la disminución de luz solar, debido a la gran altura y tamaño que alcanzan, produciendo un cambio de fase de crecimiento exponencial a fase de muerte ⁽⁷⁾; de esta forma, mediante procesos de amonización

y nitrificación, las microalgas pasaron de ser organismos vivos a materia inorgánica, dando como resultados una baja en la DBO5.

Según las medias obtenidas podemos afirmar que los STS fueron removidos con un valor de 51 mg/L en el T4, correspondiente a los nueve días de retención, el cual representa un 36,25% de remoción, considerándose como el mejor tratamiento, seguido del T3 a los seis días con un valor de 63 mg/L lo que representa un 21,25% de remoción.

Para el parámetro de DBO5, de acuerdo con las medias obtenidas, decimos que el mejor tratamiento es el T4 a los nueve días con un valor de 52 mg/L, el cual representa un 65,56% de remoción, seguido por el T3, a los seis días de tratamiento, con un valor de 62 mg/L, el cual representa un 58,94% de remoción, seguido por el T2 a los tres días de tratamiento con un valor de 94 mg/L, el cual representa una remoción del 37,75%, finalmente, tenemos al T1 a los cero días de tratamiento donde se obtuvo 151 mg/L.

El parámetro de pH, no presenta grandes variaciones luego del tratamiento con FMF, los valores obtenidos a los nueve, seis y tres días no muestran una dispersión considerable entre valores, pero si analizamos los valores obtenidos a los nueve días de tratamiento, podemos decir que son ligeramente menos neutros a los del tiempo de tres días. Asimismo, podemos decir que el parámetro del pH es un factor importante en la realización de procesos del sistema de tratamiento de aguas residuales, el rango ideal para el funcionamiento de estos procesos es de 6,5 a 8,5 unidades de pH⁽⁸⁾, lo cual indica que los resultados obtenidos se encuentran dentro del rango ideal para el buen funcionamiento del sistema.

CONCLUSIONES

Se evaluó la capacidad de fitodepuración de las aguas residuales mediante FMF, para los parámetros de DBO5, STS y pH, a los tres, seis y nueve días, de los cuales se determinó que con respecto a los resultados obtenidos en un tiempo cero (80 mg/L de STS, 151 mg/L de DBO5 y 7,6 unidades de pH), la mejor capacidad de fitodepuración fue alcanzada a los nueve días con valores de a 51 mg/L de STS, 52 mg/L de DBO5 y 7,5 unidades de pH⁽⁶⁾.

Se evaluaron los parámetros físicos y químicos del agua residual como afluente del sistema de tratamiento propuesto, en un tiempo cero, cuyos resultados fueron 80 mg/L para STS, 151 mg/L para la DBO5 y 7,6 unidades de pH; de los cuales solo el DBO5 sobrepasa los LMP, con un valor de 151 mg/L⁽⁷⁾.

Se desarrolló el sistema de tratamiento de aguas residuales propuesto, en la "Asociación Reforestación Omo" para tratar 496 L de aguas residuales, mediante la instalación de 210 plantas de junco transformadas en flotantes a través de bandejas almacigueras, el sistema fue evaluado en tres momentos a los tres, seis y nueve días, cuyo mejor desempeño alcanzado fue a los nueve días con valores menores a los obtenidos del agua residual sin tratamiento^(7, 8).

Se evaluó la calidad de las aguas residuales a través de tres parámetros (STS, DBO5 y pH) medidos en el efluente del sistema de tratamiento de FMF a los tres, seis y nueve días de retención, obteniéndose los siguientes resultados a los tres días, 218 mg/L de STS, 94 mg/L de DBO5 y 7,4 unidades de pH; a los seis días, 63 mg/L de STS, 62 mg/L de DBO5 y 7,5 unidades de pH y a los nueve días, 51 mg/L de STS, 52 mg/L de DBO5 y 7,5 unidades de pH, concluyendo de este modo que a los nueve días de retención se obtuvo la mejor eficiencia del tratamiento.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

1. Superintendencia Nacional de Servicios de Saneamiento. *Estudio Diagnóstico Situacional de los Sistemas de Tratamiento de Aguas Residuales en las EPS del Perú y Propuestas de Solución*. Lima: SUNASS. 2008. Recuperado de http://www.proagua.org.pe/files/de62b65581b727d66847f48aa52fbbfd/Libro_PTAR.pdf
2. Yee-Batista, C. *Un 70 % de las aguas residuales de Latinoamérica vuelven a los ríos sin ser tratadas*. Banco Mundial, BIRF - AIF. 2013. Recuperado de <http://www.bancomundial.org/es/news/feature/2014/01/02/rios-de-latinoamerica-contaminados>
3. Reynolds, Kelly. *Tratamiento de Aguas Residuales en*

- Latinoamérica: Identificación del Problema. 2002. Recuperado de <http://www.agualatinoamerica.com/docs/pdf/DeLaLaveSepOct02.pdf>
4. Ministerio de Vivienda, Construcción y Saneamiento. RM 273-2013-VIVIENDA. Aprueban el protocolo de Monitoreo de la Calidad de los Efluentes de las Plantas de Tratamiento de Aguas Residuales Domésticas o Municipales – PTAR. Publicada el 24 de octubre de 2013. Perú. 2013. Recuperado de <http://www.vivienda.gob.pe>
 5. Calzada Benza, José. Métodos estadísticos para la investigación. Lima, Perú. 1982: Milagros
 6. Núñez, R., Meas, Y., Ortega, O. y Olgún, E. Fitorremediación: fundamentos y aplicaciones. 2004. Recuperado de http://datateca.unad.edu.co/contenidos/301332/CORE_2013/Actividad_7.pdf
 7. Saavedra Castillo, Boris. Aplicación de macrófitas en flotación como ayuda en el tratamiento de aguas residuales en la laguna UDEP. 2017. Recuperado de https://pirhua.udep.edu.pe/bitstream/handle/11042/2724/ING_573.pdf?sequence=1&isAllowed=y
 8. Romero Rojas, Jairo Alberto. Tratamiento de aguas residuales por lagunas de estabilización. México, 1999. Alfaomega

Correspondencia

Yajaira Balmi Coayla Mamani

Universidad José Carlos Mariátegui. Facultad de Ingeniería y Arquitectura. Escuela profesional de Ingeniería Ambiental. Moquegua Ciudad Universitaria - C.P. San Antonio S/N, Moquegua 18001 – Perú
balmi_16_12@hotmail.com