

DISEÑO SOSTENIBLE DE UN MÓDULO INNOVADOR DE  
TRATAMIENTO BIOLÓGICO DE AGUAS RESIDUALES EN  
COMUNIDADES RURALES ANDINAS VULNERABLES UTILIZANDO  
*Nostoc commune*  
CASO: COPORAQUE-CAYLLOMA (PERÚ)

SUSTAINABLE DESIGN OF AN INNOVATIVE MODULE FOR  
BIOLOGICAL WASTEWATER TREATMENT IN VULNERABLE RURAL  
ANDEAN COMMUNITIES USING *Nostoc commune*  
STUDY CASE: COPORAQUE-CAYLLOMA (PERU)

Roque-Rodríguez, Francisco Javier<sup>1,2</sup>, Ph.D; Huanca Florez, Renato Manuel<sup>2</sup>, B.Eng; Chirinos Ortiz, Bryan Manuel<sup>2</sup>, B.Eng; Delgado Pineda, Daniela<sup>1,2</sup>, B.Eng.; Álvarez Tejada, Erik Miguel<sup>2</sup>, B.Eng; Medina Ramos, Robert Joaquín<sup>2</sup>, M.Sc.

<sup>1</sup>Universidad Nacional de San Agustín de Arequipa, Perú, froque@unsa.edu.pe

<sup>2</sup>Universidad Católica de Santa María, Perú, renato.huancaf@ucsm.edu.pe,  
bryanchirinosortiz@gmail.com, daniela.delgado@cepr.unsa.edu.pe,  
erik.alvarez@ucsm.edu.pe, robert.medina@ucsm.edu.pe

Digital Object Identifier (DOI):  
<http://dx.doi.org/10.18687/LACCEI2021.1.1.582>  
ISBN: 978-958-52071-8-9 ISSN: 2414-6390

# DISEÑO SOSTENIBLE DE UN MÓDULO INNOVADOR DE TRATAMIENTO BIOLÓGICO DE AGUAS RESIDUALES EN COMUNIDADES RURALES ANDINAS VULNERABLES UTILIZANDO *Nostoc commune*

## CASO: COPORAQUE-CAYLLOMA (PERÚ)

### SUSTAINABLE DESIGN OF AN INNOVATIVE MODULE FOR BIOLOGICAL WASTEWATER TREATMENT IN VULNERABLE RURAL ANDEAN COMMUNITIES USING *Nostoc commune*

#### STUDY CASE: COPORAQUE-CAYLLOMA (PERU)

Roque-Rodríguez, Francisco Javier<sup>1,2</sup>, Ph.D; Huanca Florez, Renato Manuel<sup>2</sup>, B.Eng; Chirinos Ortiz, Bryan Manuel<sup>2</sup>, B.Eng; Delgado Pineda, Daniela<sup>1,2</sup>, B.Eng.; Álvarez Tejada, Erik Miguel<sup>2</sup>, B.Eng; Medina Ramos, Robert Joaquín<sup>2</sup>, M.Sc.

<sup>1</sup>Universidad Nacional de San Agustín de Arequipa, Perú, froque@unsa.edu.pe

<sup>2</sup>Universidad Católica de Santa María, Perú, renato.huancaf@ucsm.edu.pe,  
bryanchirinosortiz@gmail.com, daniela.delgado@cepr.unsa.edu.pe,  
erik.alvarez@ucsm.edu.pe, robert.medina@ucsm.edu.pe

#### RESUMEN

La pobreza rural y el desarrollo incipiente del campesinado peruano altoandino y de otras latitudes cercanas de la región sur y centroamericana de nuestro continente se debe principalmente a la falta de acceso a servicios básicos (educación, salud, saneamiento y, muchas veces, suministro eléctrico), recursos tecnológicos y conocimiento técnico. Coporaque es un distrito peruano situado en la provincia de Caylloma en la región de Arequipa que cuenta con un área total de 112 Km<sup>2</sup> y que posee una población total de 973 habitantes principalmente quechua hablantes [13] en donde se considera a diversos caseríos y pequeños centros poblados dispersos siendo su principal centro poblado su capital del mismo nombre y caracterizados por su orfandad con las mesas de trabajo del Gobierno Regional de Arequipa al cual se encuentran afirmado su desarrollo y crecimiento socioeconómico. Uno de los problemas más grandes que presenta esta zona es el escaso y en ocasiones nulo tratamiento de sus aguas residuales domésticas por la carencia de sistemas depuradores que ocasiona un desmedro en su calidad de vida, así como en el cuidado y reutilización del recurso hídrico sin ocasionar contaminación e impacto ambiental. Dentro de este contexto, se diseñó y configuró un módulo de tratamiento con base biológico (usando *Nostoc commune* nativo de la zona) para depurar fisicoquímica y microbiológicamente sus aguas residuales domésticas (ARD) hasta cumplir con la normativa peruana (DS-003-2010 MINAM) para otorgarle calidad de agua apta para riego y bebida de animales logrando además su reincorporación de manera sostenible y limpia al ecosistema. Los resultados experimentales mostraron una remoción superior del 78% de patógenos microbianos y contaminantes comunes a partir de la instalación del módulo de

tratamiento su posterior puesta en marcha en la zona de influencia. El aspecto innovador del módulo de tratamiento (MITBAR) generado consistió en el uso de una cianobacteria macrófita nativa de la zona y conocida localmente como murmunta (*Nostoc commune*) que prolifera en sus cauces comúnmente fríos de agua dulce y es considerada únicamente como biomasa natural sin aplicación. Adicionalmente se presenta la estructura completa del diseño del módulo de tratamiento en su operación efectiva para el tratamiento de las ARD generadas en la zona geográfica reportada.

**Palabras clave—** Diseño sostenible, Módulo innovador de tratamiento biológico de aguas residuales, Comunidades rurales andinas vulnerables, *Nostoc commune*, Coporaque.

#### ABSTRACT

Rural poverty and poor development of the Peruvian high Andean peasantry and other nearby latitudes of the Southern American region of our continent is mainly due to the lack of access to basic services (education, health, sanitation and, many times, electricity supply), technological resources and technical knowledge. Coporaque is a peruvian district located in Caylloma province (Arequipa-Peru) that has a total area of 112 Km<sup>2</sup> and it has a total population of 973 inhabitants mainly Quechua-speaking [13] that considers several hamlets and small centers with dispersed settlements being its main populated center its capital of the same name and characterized by its orphanhood with the working groups of the Regional Government of Arequipa to which its development and socioeconomic growth are affirmed. One of the main problems that this area presents is the scarce and null treatment of its domestic wastewater due to the lack of purification systems that

causes a deterioration in its quality of life and in the care and reuse of water resources without generating environmental impact and serious pollution. In this context, a bio-based treatment module was designed and configured (using native *Nostoc commune*) to purify domestic wastewaters in physico-chemical and microbiological terms to give it a suitable water quality for irrigation and animal consumption and sustainable achieving its clean reincorporation to the ecosystem. The experimental results showed an elimination of more than 78% of microbial pathogens and common contaminants when the treatment module was installed and started up in the influence area. The innovative aspect of the treatment module generated consisted in the use of a macrophytic cyanobacterium native to the area and known, commonly, like common murmunta (*Nostoc commune*) that proliferates in cold freshwater channels and is considered only as natural biomass without application. Additionally, the complete structure of the treatment module design is presented in its effective operation for the treatment of domestic wastewaters generated in the reported geographic area.

**Keywords— Sustainable design, Innovative module for biological wastewater treatment, Vulnerable Andean rural communities, *Nostoc commune*, Coporaque.**

## I. INTRODUCCIÓN

En nuestro país y en el mundo uno de los problemas prioritarios en comunidades periféricas y/o rurales socio-económicamente vulnerables es la escasez de agua [4] [5] apta para beber que se viene incrementando principalmente debido a una serie de factores, tales como, cambio climático, crecimiento poblacional, pérdida de ecosistemas naturales y la casi nula transferencia tecnológica asequible para su desarrollo sostenible. Por lo que la forma en que las sociedades deben gobernar sus recursos y servicios hídricos infliere profundos impactos en el sustento de las personas y en su sostenibilidad futura [3]. El acceso actual y oportuno al agua es, para muchas personas, una cuestión de supervivencia diaria incluyendo el resquebrajamiento del círculo vicioso de la pobreza [4]. Por tal razón, cualquier contribución a la mejora de la gobernanza del agua es esencial para aliviar la pobreza mundial y, en especial, de comunidades vulnerables de todas las zonas geográficas del orbe en la que en nuestra parte del mundo es casi muy frecuente observar este problema. Es así que el tratamiento de las aguas negras es esencial para poder mantener la calidad de los cuerpos de agua a los que son derivados, así como reaprovecharla en agricultura, riego de áreas verdes y hasta potabilizarla. [6]

El uso de módulos de tratamiento con base biológica, se han popularizado bastante en las comunidades de pueblos rurales, por su facilidad para su empleo y construcción con materiales propios de la zona. [9] [12]

Las micro algas presentes en cualquier ecosistema del planeta, poseen la capacidad de generar un aproximado del 50% de la producción de oxígeno, siendo calificadas como una importante

fuerza de biomasa son capaces de cultivarse en cualquier tipo de agua y la gran ventaja de poder remover contaminantes. [1]

El género *Nostoc* es una colonia de cianobacterias esféricas de coloración verde azulada cuyo diámetro oscila entre los 10 y 25mm., Además de ser capaces de fijar nitrógeno, tener una alta resistencia a la radiación UV y temperaturas extremas, son útiles en la depuración de aguas servidas y producen importantes cantidades de biomasa. [2]

La legislación peruana establece que para poder determinar la eficacia en cuanto a depuración de contaminantes, específicamente para aguas residuales domésticas existen diferentes dispositivos legales que regulan su construcción u operación; entre ellos, el D.S. N°003-2010-MINAM “Límites Máximos Permisibles para efluentes de las Plantas de Tratamiento de Aguas Residuales Domésticas o Municipales”, la cual corresponde a la normativa nacional peruana, siendo los parámetros a evaluar: aceites y grasas, demanda química de oxígeno, sólidos totales suspendidos, demanda bioquímica de oxígeno, coliformes termotolerantes, pH y temperatura.

Es así, que se aplicó el *Nostoc* en un sistema de tratamiento secundario, en un diseño a escala, que puede llegar aplicarse en comunidades, que no cuentan con una adecuada gestión de sus efluentes líquidos, similares al caso de estudio, logrando así depurar el agua residual para su disposición final, además de poder darle un valor agregado al *Nostoc commune*.

El objetivo del presente trabajo consistió en diseñar en base sostenible un módulo de tratamiento de aguas residuales biológico de carácter innovativo, capaz de utilizar biotecnologías empleando como material biológico a la murmunta (*Nostoc commune*) características de la zona en un contexto de desarrollo social, de comunidades rurales y andinas vulnerables, aplicado en el anexo poblado de Coporaque Provincia de Caylloma, Región Arequipa-Perú. Adicionalmente, se consiguió la adaptación de cepas nativas de *Nostoc commune* como vector biológico efectivo en el MITBAR propuesto y la configuración y distribución descrita por diseño de los principales elementos que conformaron el sistema.

## II. METODOLOGÍA

### A. Geolocalización digital 3D de la Zona:

Para la caracterización de la zona se recopiló información sobre el medio físico y biológico, además se generó un modelo 3D de la zona del proyecto que comprende la ubicación del Centro Poblado de Coporaque, la ubicación del sistema convencional actual, y los cuerpos de agua en los que son vertidas las aguas residuales, en donde se utilizó el programa Arcgis versión 10.5, (Arcmap y Arcscene) y soporte del programa SasPlanet V.2020 para la descarga de imágenes satelitales.

### B. Participación ciudadana:

Se realizó una encuesta socioeconómica con carácter multitemático a una muestra representativa de 90 individuos asentados en el Centro Poblado de Coporaque con la finalidad de determinar la aceptabilidad del proyecto para su implementación que incluyó diversas preguntas estructuradas para evaluar la impresión personal del encuestado con respecto a la realización del proyecto relacionadas con la temática del impacto ambiental ocasionado por las aguas residuales sin un tratamiento óptimo y su disposición a la transferencia tecnológica y a la administración directa del MITBAR propuesto en este trabajo

### C. Cultivo en laboratorio del *Nostoc commune*

Se recolectó la muestra de una zona de bofedales altoandinos de la comunidad, seguidamente se realizó el cultivo a escala laboratorio para la identificación de las fases de crecimiento utilizando el medio de cultivo BG11 que se preparó en base a las siguientes soluciones:

Solución stock 1: Se utilizó 0,1 g/L de EDTA di sódico, adicionalmente 0,6 g/L de citrato férrico y de ácido cítrico y 3,6 g/L de cloruro de calcio. Finalmente, de la solución generada se tomó 10mL para completar el procedimiento.

Solución stock 2: Se disolvió 7,5 g de sulfato de magnesio heptahidratado en un litro de agua potable. De esta solución se tomó 10 mL para la solución final.

Solución stock 3: Se disolvió 3 g de fosfato monohidrogenado dipotásico en un litro de agua potable. De esta solución se tomó 10ml para la solución final.

Solución Stock 4: Se disolvió en 1 litro de agua potable: ácido bórico, cloruro de manganeso, sulfato de zinc, sulfato de cobre, cloruro de cobalto y molibdato de sodio, de esta solución final se tomó una alícuota de 1ml. En esta mezcla se le añadió 0,02 g de carbonato de sodio y 1,5 g de nitrato de sodio, finalmente se completó la mezcla de soluciones a un litro de agua potable.

Para cada solución se inició con los medios de cultivo en un matraz Erlenmeyer de 1L, con 600 ml de cultivo, luego se lo llevó a las siguientes condiciones: luz de 1000 lux en 12 horas de luz y 12 de oscuridad, aireación constante, agitación de 128 rpm, pH en un rango de 7 - 8 y temperatura ambiente y , finalmente, este cultivo se realizó por 21 días.

Para identificar el crecimiento de la cianobacteria, se recuperó muestras de los diferentes medios de cultivo para ser observados bajo el microscopio óptico con diferentes resoluciones.

Finalmente se evaluó la turbidez de los medios de cultivo mediante el uso del espectrofotómetro en la longitud de onda de 750 nanómetros en mediciones de cada 3 días durante 21 días para determinar la concentración de *Nostoc commune* en el medio de cultivo. Se utilizó la prueba estadística Pearson para conocer el crecimiento en el tiempo y a su vez observar si los factores planteados como las horas luz, aireación, disponibilidad de nutrientes, entre otros; resultaron ser factores determinantes.

### D. Diseño del módulo de tratamiento biológico propuesto:

Se identificó los parámetros característicos de un módulo innovador de tratamiento biológico de aguas residuales (MITBAR) propuesto; entre ellos se reporta: i) Población, ii) Caudal de diseño (QP), iii) Demanda bioquímica de oxígeno (DBO), iv) Coliformes totales, y v) Temperatura del mes más frío. Se presenta en la tabla I los parámetros iniciales del sistema MITBAR.

TABLA I  
PARÁMETROS INICIALES DEL MITBAR

Población.	1885 HAB
Caudal de diseño (QP)	31/s
Demanda bioquímica de oxígeno.	66.2 mgDBO/L
Coliformes totales.	3.5X10 <sup>6</sup> nm /100mL
Temperatura del mes más frío	7°C

Se consideró, adicionalmente, para la medición de parámetros los LMP para aguas domésticas descritos detalladamente en la tabla II:

TABLA II  
LÍMITES MÁXIMOS PERMISIBLES (LMP'S) PARA AGUAS RESIDUALES DOMESTICAS

PARÁMETRO	UNIDAD	LMP
Aceites y grasas	mg/L	20
Demanda Química de Oxígeno	mg/L	200
Sólidos Totales Suspendidos	mg/L	150
Demanda Bioquímica de Oxígeno	mg/L	100
Coliformes Termotolerantes	NMP/ 100 mL	10000
PH	Unidad	6,5-8,5
Temperatura	°C	<3,5

Fuente: Decreto Supremo N°003-2010-MINAM

### E. Dimensionamiento del Sistema de lagunas experimental

Se dimensionó la laguna en base al conocimiento de los parámetros iniciales. Se trabajó el sistema en base a los datos de Temperatura del mes más frío, con un caudal promedio QP de 2 mL/s y valores iniciales de DBO (66,2 mg/l), asimismo se realizó el cálculo del dimensionamiento de lagunas facultativas mediante el método de la Organización Panamericana de la Salud desarrollado en su Guía para el diseño de tanques sépticos, tanques Imhoff y lagunas de estabilización (Organización Panamericana de la Salud, 2005)

Se halló también la carga orgánica (C) y la carga superficial a través de las ecuaciones (5) y (6).

$$C = \frac{\text{Población (Contribución percapita DBO)}}{1000} \quad (5)$$

$$CS_{\text{diseño}} = (2.50)(1.05)^{(T-20)} \quad (6)$$

Donde la temperatura de diseño está dada por la temperatura promedio del mes más frío aumentada en 1°C. Posteriormente se procedió a la hallar el área de la laguna mediante la división de ambas cargas, transformando su resultado en Ha a m2 y dividiendo el área final entre 2 para cumplir con el sistema en paralelo, usando la ecuación (7).

$$\text{Área} = \frac{C}{CS_{\text{diseño}}} \quad (7)$$

Una vez el área (A), calculada se procedió a realizar el cálculo del volumen de cada laguna, la guía da la opción de escoger una profundidad (Z) entre 1.5m a 2m por lo que se tomó 2 m como profundidad para las lagunas usando la ecuación (8).

$$V = (A)(Z) \quad (8)$$

Finalmente se determinó el tiempo de retención hidráulica mediante la ecuación (9).

$$PR_{\text{teorico}} = \frac{V}{Qp} \quad (9)$$

Como datos adicionales se calculó el tiempo de retención hidráulico real utilizando el factor de corrección hidráulica (Fch) con un valor de 0,6 para presas de tierra y se recalculo el área para poder trabajar con medidas a reales mediante la ecuación (10).

$$PR_{\text{real}} = (PR_{\text{teorico}})(Fch)_{(10)}$$

## F. Configuración del sistema experimental.

El sistema está conformado por un tanque Rotoplas de 1m3 que sirvió para tener un control de la dotación y a su vez trabajó como desarenador, el sistema posee también un recipiente de 250 litros de PVC que simuló al tanque Imhoff, asimismo, se adicionó al sistema dos lagunas de estabilización facultativas en paralelo las cuales estuvieron recubiertas en geomembrana. Finalmente, el *Nostoc commune* se colocó mediante el uso de mallas a una profundidad de 20cm. a una de las lagunas y se esperó 3 semanas para la toma de muestras de ARD.

Cabe mencionar que las uniones de todo el sistema se realizaron mediante mangueras siliconadas de 3/8 y válvulas tanto “Y” como llaves de paso. Además, de que el sistema tuvo flujo continuo, debido al uso de una bomba peristáltica instalada en la salida del tanque Rotoplas el cual era llenado por bombeo cada 7 días.

## G. Análisis del pre tratamiento y post tratamiento

Se comprobó la efectividad del tratamiento propuesto se procedió a realizar la toma de muestras del agua tratada del sistema actual de la PTAR del centro poblado de Coporaque y del tratamiento biológico secundario con el *Nostoc commune*, comparando los datos con la legislación peruana DS -003-2010- MINAM, en donde se seleccionó los parámetros de DBO5, DQO, SST y coliformes termotolerantes, estos parámetros fueron evaluados por un laboratorio local. Con la obtención de los valores del muestreo de agua se realizó una comparación utilizando herramientas estadísticas para ver la eficiencia del *Nostoc commune* como implementación de tratamiento secundario biológico.

## III. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

### A. Caracterización de la Zona

En la figura 1 se observa el modelo 3D, con base satelital Bing, en donde se identifica la ubicación del Centro Poblado de Coporaque y la ubicación del MITBAR, que se halla a unos 300 metros de distancia, el río que capta los efluentes de dicho centro poblado se llama río Cuntumayo y es un afluente del río Colca, al que llegan estas aguas contaminadas. Además, se muestra la altitud en msnm del recorte en 3D que es un cuadrángulo de (2300 m x 2700 m reales), que está comprendido de los 3394 msnm a los 4080 msnm. Se puede apreciar una zona de naturaleza andina, con cerros, ríos, caminos, cultivos agrícolas en zona llana y en andenes, vegetación boscosa en las laderas de los cerros y en los márgenes del río Cuntumayo y río Colca.

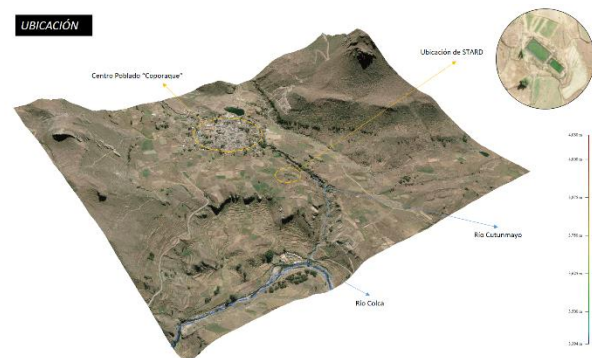


Fig. 1. Modelo 3D de la zona del proyecto

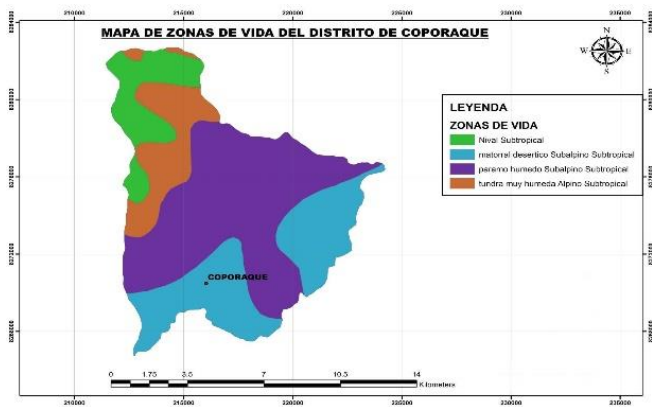


Fig. 2. Mapa de Zonas de Vida Natural del Distrito de Coporaque

El medio biológico representa el lugar seleccionado que se encuentra en el área de vida del Matorral desértico sub alpino sub tropical. Esta área se divide en la vertiente occidente de los Andes en las cuencas de los ríos Huarmey, Sama, Caplina, Majes, Colca, Ocoña, Locumba (Instituto Nacional de Recursos Naturales, 1995).

Esta zona de vida en Perú cuenta con 4515 km<sup>2</sup> de superficie, la temperatura llega a 13 °C, con precipitaciones entre 285 y 239 mm pluviales (Instituto Nacional de Recursos Naturales, 1995).

### B. Participación ciudadana

Las encuestas realizadas muestran que el 93% de la población considera que el agua residual no tratada es peligrosa y les puede traer problemas, mientras que un 7 % considera que no es tan nociva salvo para los cultivos, por lo cual también se muestra que el 96% de los participantes están a favor de la implementación de la transferencia tecnológica.

### C. Cultivo en laboratorio

En la figura 3 se observa la identificación morfológica del *Nostoc commune* evidenciando su forma y color característico (verde brillante) de acuerdo a lo reportado en la literatura [8].



Fig. 3. Vista de colonias de *Nostoc commune* a 100x

Como se observa en la Tabla III, los resultados indican que el crecimiento de las muestras fue positivo, destacándose la muestra número 1 por su cantidad de masa, las medidas de absorbancia al estar en el intervalo de 0 a 2 son aceptables. Además, se puede observar que el *Nostoc commune* presenta un crecimiento acelerado en las dos primeras semanas con absorbancias cercanas al 0.3 en las primeras semanas, entrando a la fase de latencia en la tercera semana al mostrar una absorbancia de 0.1

TABLA III  
ABSORBANCIA DE LAS MUESTRAS

Tiempo	Absorbancia	
	Muestra 1	Muestra 2
0	0.055	0.055
3	0.081	0.080
6	0.116	0.100
9	0.127	0.126
12	0.155	0.126
15	0.164	0.147
18	0.173	0.151
21	0.188	0.158
COEF. PEARSON	0.9787	0.9687
COEF.DET	0.9579	0.9384

En el análisis estadístico se determinó que existe una correlación directa entre el aumento de la absorbancia y el paso del tiempo para ambas muestras lo cual nos indica que el crecimiento fue positivo, teniendo valores de 0.9787 para la muestra 1 y de 0.9687 para la muestra 2.

Además, el coeficiente de determinación al tener un porcentaje alto no solo indica que existe dependencia entre estas 2 variables, sino que además indica una fortaleza en la relación lineal de tiempo y absorbancia.

### D. Configuración del Sistema Experimental

La figura 4 presenta la descripción fotográfica que consistió en la configuración in situ del sistema experimental aplicado en campo y que opero en forma efectiva de acuerdo con el diseño propuesto en este estudio.





Fig.4.a.Sistema de Bombeo de agua residual, b. Dispensador/Sedimentador de agua residual c. Prototipo de Tanque Imhoff, d. Construcción de lagunas de estabilización en tierra, e. Revestimiento con Geomembrana, f. Sistema general con *Nostoc commune*.

TABLA V  
RESULTADOS DEL MONITOREO INICIAL DE LAS AGUAS RESIDUALES TRATADAS

PARÁMETROS	RESULTADOS
TSS (ml/l)	97.9
ACEITES Y GRASAS (mg/L)	22.7
DBO (mg/l)	66.2
DQO (mg/l)	321.1
COLIFORMES TERMOTOLERANTES (NMP/100ml)	3500000

Los resultados del monitoreo inicial, indican que se trata de un agua con valores de poca contaminación como en el caso de DBO y SST donde el efluente se encuentra bajo los LMP del DS003-2010. De otro lado, los resultados de la eficiencia del diseño experimental se pueden observar en la Tabla VI, Tabla VII y Tabla VIII.

TABLA VI  
RESULTADOS DEL TRATAMIENTO DE LA MUESTRA 1

PARAMETROS	LAGUNA 1	LAGUNA 2
TSS (mg/L)	22.4✓	17.6✓
ACEITES Y GRASAS (mg/L)	6.5✓	6.3✓
DBO (mg/lL)	18.9✓	20.4✓
QO (mg/L)	59.7✓	66.4✓
COLIFORMES TERMOTOLERANTES (NMP/100mL)	232 500	339 000

### E. Dimensionamiento del Sistema de lagunas experimental.

La tabla IV muestra el resumen del diseño experimental aplicado en la laguna de estabilización.

TABLA IV  
RESULTADOS DEL DISEÑO EXPERIMENTAL

UNIDAD	DIMENSION	VALOR
LAGUNAS DE ESTABILIZACION	Carga orgánica	0.0114 kg DBO/ día
	Temperatura de diseño	8°C
	Carga superficial	139.21 Kg DBO/ ha día
	Área total	0.8189 m <sup>2</sup>
	Volumen de cada laguna	818 L.
	Ancho	1.3 m
	Largo	1.9 m
	Profundidad	40 cm
	Volumen real	988 L
Periodo de retención hidraulica	9.15 día	

### F. Análisis del pre tratamiento y post tratamiento

La tabla V muestra los resultados del monitoreo inicial de las aguas residuales tratadas

En el primer muestreo se determinó que hay disminución en el caso de ambas lagunas para todos los parámetros, cumpliendo con los LMP del DS 003-2010, salvo en el caso de coliformes termotolerantes. A su vez, la laguna con *Nostoc commune* fue más eficiente en parámetros químicos y biológicos como el DBO, DQO y coliformes termotolerantes, sin embargo, la laguna N°2 lo fue en aceites y grasas y TSS.

Para los siguientes muestreos se evaluaron solamente los parámetros de DBO, DQO y coliformes termotolerantes, ya que son los principales afectados por el tratamiento de lagunaje,

TABLA VII  
RESULTADOS DEL TRATAMIENTO DE LA MUESTRA 2

PARÁMETROS	LAGUNA 1	LAGUNA 2
DBO5 (mg/L)	21✓	22.5✓
DQO (mg/L)	64.7✓	72.7✓
COLIFORMES TERMOTOLERANTES (NMP/100mL)	299250	369500

El muestreo 2 permitió definir que la laguna N°1 redujo significativamente los parámetros en relación a la laguna sin *Nostoc commune*; sin embargo, se observó un incremento en los parámetros de ambas lagunas comparadas con el muestreo 1. Del mismo modo se volvió a repetir la tendencia del cumplimiento con la normativa salvo en el caso de coliformes.

TABLA VIII  
RESULTADOS DEL TRATAMIENTO DE LA MUESTRA

RENDIMIENTO DEL DISEÑO EXPERIMENTAL		
PARAMETROS	%	
	LAGUNA N°1	LAGUNA N°2
TSS	77.1195	82.0225
ACEITES Y GRASAS	71.3656	72.2467
DBO	70.2920	67.9255
DQO	81.0132	78.4698
COLIFORMES TERMOTOLERANTES	92.8786	90.1571
RENDIMIENTO TOTAL	78.5338	78.16432648

En el tercer monitoreo, se observó que el ARD tuvo una disminución en torno a sus parámetros, comparado con la muestra 2 para ambas lagunas, lo cual indica que el sistema está funcionando óptimamente debido a que el tiempo no alteró su rendimiento y se trata de un sistema abierto. A continuación, se presentan los resultados del tratamiento de la muestra analizada en la tabla IX

TABLA IX  
RESULTADOS DEL TRATAMIENTO DE LA MUESTRA

PARAMETROS	LAGUNA 1	LAGUNA 2
DBO5 (mg/L)	19.1 ✓	20.8 ✓
DQO (mg/L)	58.5 ✓	68.3 ✓
COLIFORMES TERMOTOLERANTES (NMP/100mL)	216 000	325 000

La laguna que trabajó con *Nostoc commune* obtuvo un mayor rendimiento en los parámetros biológicos y químicos llegando a eficiencias de 81.39% vs un 78.84 % de la laguna sin componente biológico. Sin embargo, para los parámetros físicos se observó que hubo mayor rendimiento en la laguna sin *Nostoc commune*, debido al incremento de la biomasa y a las características propias de la especie biológica utilizada. En el caso de las coliformes termotolerantes la mayor reducción de la laguna N°1 produjo un alto porcentaje de poli fenoles que posee el *Nostoc commune* que son capaces de inhibir bacterias como la *E.coli* y la *Salmonella sp.*

## CONCLUSIONES

El crecimiento de la especie *Nostoc commune* fue positivo tanto en el MITBAR a escala como en el laboratorio, demostrando que la especie mencionada tiene una gran capacidad de adaptabilidad y resistencia a condiciones climáticas desfavorables.

Se estableció como sistemas de depuración para Coporaque el tanque Imhoff y las lagunas de estabilización facultativas, debido a su simplicidad operacional, logrando obtener un La producción de lodos activos junto con la biomasa cultivada de *Nostoc commune* permitirá un desarrollo social sostenible proporcionando beneficios económicos a la población andina analizada que suministró la extracción de lodos y biomasa por parte de la población beneficiada permitirá el mantenimiento de las lagunas facultativas, haciendo así sostenible al sistema.

El tratamiento de las aguas residuales de Coporaque resultó efectivo debido, principalmente, a que se trata de una población altoandina donde sus actividades principales son agricultura y turismo, lo que conlleva a que sus aguas no tengan un alto grado de contaminación comparado con el de otras localidades.

La cianobacteria utilizada (*Nostoc commune*) resultó ser una microalga muy útil para diversos fines, desde la depuración de aguas residuales hasta nutrición y uso de fertilizantes agrícolas, debido a la importante cantidad de nitrógeno que contiene. En el caso del tratamiento de aguas residuales ayudó a aumentar la efectividad del tratamiento en un 13.9 %. En adición, se concluye que el pH del ARD se neutralizó a rangos cercanos a pH 7-8, lo cual resulta ser muy recomendable para el desarrollo de la microalga y se encuentra dentro de los LMP permitidos. Con los resultados obtenidos de este estudio el desarrollo sostenible de esta comunidad estaría de acuerdo con el cumplimiento de la agenda ONU-2030: ODS-6 (agua limpia y saneamiento), ODS-11 (Ciudades y comunidades sostenibles). Finalmente, se pudo concluir que en el MITBAR utilizado el tratamiento del agua residual doméstica a razón de 2 mL/s teniendo un tiempo de retención hidráulica superior a 9 días cumple con la recomendación de la Organización Panamericana de la Salud (OPS) para remoción de patógenos.

## AGRADECIMIENTOS

Este trabajo fue soportado con el apoyo logístico de la Municipalidad Distrital de Coporaque, entidad gubernamental a la cual se agradece su colaboración significativamente.



## CONFLICTOS DE INTERÉS

Los autores declaran que en la redacción de este trabajo no existen conflictos de interés.

## BIBLIOGRAFÍA

- [1] Kumar, P.K., Krishna, S.V., Naidu, S.S., Verma, K., Bhagawan, D., Himabindu, V., 2019. Biomass production from microalgae *Chlorella* grown in sewage, kitchen wastewater using industrial CO<sub>2</sub> emissions: comparative study. *Carbon Resour. Convers.* 2, 126–133
- [2] Matamoros V, Gutiérrez R, Ferrer R, García J, Bayona JM (2015) Capability of microalgae-based wastewater treatment systems to remove emerging organic contaminant: a pilot-scale study. *J Hazard Mater* 288:34–42.
- [3] Allen, M.R.; Dube, O.P.; Solecki, W.; Aragon-Durand, F.; Cramer, W.; Humphreys, S.; Kainuma, M.; Kala, J.; Mahowald, N.; Mulugetta, Y.; et al. Framing and Context. In *Global Warming of 1.5 °C—An IPCC Special Report on the Impacts of Global Warming of 1.5 °C Above Pre-Industrial Levels and Related Global Greenhouse Gas Emission Pathways, in the Context of Strengthening the Global Response to the Threat of Climate Change, Sustainable Development, and Efforts to Eradicate Poverty*; Masson-Delmotte, V., Zhai, P., Portner, H.-O., Roberts, D., Skea, J., Shukla, P.R., Pirani, A., Moufouma-Okia, W., Pean, C., Pidcock, R., et al., Eds.; IPCC: Geneva, Switzerland, 2018.
- [4] Delgado-García, Sandra. Milena, Trujillo-González, Juan Manuel, Torres-Mora, Marco Aurelio, Gestión del agua en comunidades rurales; caso de estudio cuenca del río guayuriba, meta colombia. *Revista Luna Azul* [Internet]. 2017; (45):59-70.
- [5] Oppliger, Astrid, Höhl, Johanna, & Fragkou, María. (2019). Escasez de agua: develando sus orígenes híbridos en la cuenca del Río Bueno, Chile. *Revista de geografía Norte Grande*, (73), 9-27. <https://dx.doi.org/10.4067/S0718-34022019000200009>
- [6] Francisco Pedrero, Ioannis Kalavrouziotis, Juan José Alarcón, Prodromos Koukoulakis, Takashi Asano, Use of treated municipal wastewater in irrigated agriculture—Review of some practices in Spain and Greece, *Agricultural Water Management*, Volume 97, Issue 9, 2010, Pages 1233-1241, ISSN 0378-3774. <https://doi.org/10.1016/j.agwat.2010.03.003>.
- [7] Pontificia Universidad Católica de Chile. (2017). Protocolos para preparación de medio de cultivos. Unidad de micro y macroalgas, 52.
- [8] Rosales-Loaiza, Néstor, Díaz, Laugeny, Aiello-Mazzarri, Cateryna, Morales-Avendaño, Ever, Cultivos a cielo abierto de las cianobacterias *Nostoc LAUN0015* y *Anabaena MOF015* para la producción de biomasa enriquecida. Pruebas piloto para cultivos masivos. *Revista CENIC. Ciencias Biológicas* 2017;48(3):81-86. <https://www.redalyc.org/articulo.oa?id=181253610006>
- [9] Kretschmer F, Neugebauer G, Stoeglehner G, Ertl T. Participation as a Key Aspect for Establishing Wastewater as a Source of Renewable Energy. *Energies*. 2018; 11(11):3232. <https://doi.org/10.3390/en11113232>
- [10] R. Yuvakkumar, V. Elango, R. Venkatachalam, N. Kannan & P. Prabu (2011) Influence of Nano Nutrients on Heterocyst-Forming Cyanobacterium *Anabaena ambigua* Rao, *Synthesis and Reactivity in Inorganic, Metal-Organic, and Nano-Metal Chemistry*, 41:10, 1234-1239, <https://doi.org/10.1080/15533174.2011.591875>
- [11] Karan T, Erenler R. Screening of Norharmane from Seven Cyanobacteria by High-performance Liquid Chromatography. *Pharmacogn Mag.* 2017;13(Suppl 3): S723-S725. <https://doi.org/10.4103/pm.pm.214.17>
- [12] Yifeng Wu, Wenbo Zhu, Xiwu Lu, Identifying key parameters in a novel multistep bio-ecological wastewater treatment process for rural areas, *Ecological Engineering*, Volume 61, Part A, 2013, Pages 166-173 <https://doi.org/10.1016/j.ecoleng.2013.09.049>.
- [13] Instituto Nacional de Estadística e Informática. INEI.(2015). Banco Censual de Información Distrital. Retrieved April 11, 2015.