Effect of granulometry and dilution in the treatment of poultry slaughterhouse effluents with volcanic rock filter

Rosavet Huamani-Tintaya [1], Heldy Leguía-Caballero [1], Roberto Chuquilín-Goicochea [1]
[1] Facultad de Ingeniería, Universidad Privada del Norte, Perú, N00093633@upn.pe, N00098952@upn.pe, roberto.chuquilin@upn.edu.pe

Abstract*– Water consumption in poultry slaughterhouses generates large volumes of highly polluting effluent due to the presence of organic matter, suspended solids, and fats; consequently, there is a need to employ an effective treatment using abundant, readily available materials such as volcanic rock. The objective of this study was to evaluate the effect of particle size and dilution in a volcanic rock filter on the treatment of poultry slaughterhouse effluent. A 3k factorial design was used with two factors (k = 2)—volcanic rock particle size and effluent dilution—with two replicates per treatment and five response variables: percentage removal of biochemical oxygen demand (BOD5), chemical oxygen demand (COD), total suspended solids (TSS), and total dissolved solids (TDS), as well as final pH. It was found that particle size and dilution directly influence the removal of TSS and TDS. The study determined that a particle size of 37.5 and a dilution of 40% yield the highest removal of contaminants from the poultry slaughterhouse effluent.

***Keywords--** Trickling filter, volcanic rock, BOD_5, total suspended solids, total dissolved solids.*

Efecto de la granulometría y dilución en el tratamiento de efluentes de matadero avícola con filtro de piedra volcánica

Rosavet Huamani-Tintaya [1], Heldy Leguía-Caballero [1], Roberto Chuquilín-Goicochea [1]
[1] Facultad de Ingeniería, Universidad Privada del Norte, Perú, N00093633@upn.pe, N00098952@upn.pe, roberto.chuquilin@upn.edu.pe

Resumen– ***El consumo de agua en los mataderos avícolas genera grandes volúmenes de efluentes altamente contaminantes por la presencia de materia orgánica, sólidos en suspensión y grasas; ante ello, surge la necesidad de emplear un tratamiento efectivo con materiales disponibles y abundantes como la piedra volcánica. El objetivo de este trabajo fue evaluar el efecto de la granulometría y la dilución en un filtro de piedra volcánica en el tratamiento del efluente de un matadero avícola. Se empleó un diseño factorial empleando 3^k, con 2 factores (k = 2) que fueron la granulometría de la piedra volcánica y la dilución del efluente con 2 repeticiones por tratamiento y 5 variables respuestas: porcentaje de remoción de demanda bioquímica de oxígeno (DBO_5), de demanda química de oxígeno (DQO), de sólidos suspendidos totales (SST), de sólidos solubles totales (TDS) y pH final. Se encontró que la variable granulometría y dilución influyen directamente en la remoción de SST y TDS. Se logró determinar que una granulometría de 37,5 y una dilución de 40%, proporcionan una mayor remoción de contaminantes en el efluente de matadero avícola.***

Palabras clave-- Filtro percolador, roca volcánica, DBO5, sólidos suspendidos totales, sólidos disueltos totales.

I. Introducción

Las aguas residuales de la industria avícola tienen relación directa con el crecimiento de la población mundial que ha originado una mayor demanda de alimentos, como la carne de aves de corral. La proteína animal para la población peruana es por excelencia de pollo; asimismo, este sector contribuye con el 2% del PBI nacional, el 26% del PBI agropecuario y el 65% del PBI pecuario, convirtiéndose en un componente clave de la canasta básica familiar, por lo que es importante conocer las características del uso de antimicrobianos en su producción [1].

El consumo de agua en los mataderos avícolas se dirige a enfriar, lavar, limpiar y transportar desechos, lo que resulta en un promedio de uso de 20 L/ave [2]. Por lo cual, se generan grandes volúmenes de aguas residuales, consideradas altamente contaminantes debido a su alto contenido de materia orgánica, sólidos en suspensión, mezcla compleja de grasas, proteínas, nutrientes, producto de la limpieza del estómago del pollo, mucosa intestinal, alimento sin digerir, sangre, plumas y carne y pellejos sueltos [3]; por ende, es necesario realizar un tratamiento adecuado antes de su descarga a un cuerpo de agua para evitar daños al medio ambiente como la eutrofización [4].

En el Perú en cuanto a la cobertura de saneamiento en los ámbitos urbano y rural, la brecha existente es bastante extensa. SUNASS informó que de un total de 204 PTAR evaluadas, 163 operan con altas restricciones técnicas, 9 se encontraron paralizadas y 32 en proceso de construcción [5].

El tratamiento de estas aguas residuales mediante la filtración es una buena alternativa para la disminución de los contaminantes como la carga orgánica [6].

Dentro de las alternativas para un tratamiento por medio de filtración se pueden mencionar a los filtros percoladores, que distribuidos en serie y empacados con un medio filtrante como piedra pómez, pueden lograr eficiencias de remoción de 91.20% y 93.87% de eficiencia promedio para los parámetros DBO_5 y DQO, respectivamente, durante 40 días de operación. Otra forma de aplicar los filtros percoladores es por etapas (3 etapas) y empacados con piedra volcánica y por tamaño de piedra, que en aguas domésticas puede lograr una eficiencia de remoción de 65,49% a 89,70% [7].

Otra alternativa de filtración son los filtros anaeróbicos de flujo ascendente (FAFA). En un trabajo de investigación se realizó el uso de filtro anaerobio de flujo ascendente y roca volcánica como medio de soporte para la remoción de materia orgánica en las aguas residuales, variando los tiempos de retención hidráulica y alturas del medio de soporte se logran resultados óptimos de remoción de DBO y DQO de 95,7% y 93,8% [8] . Una variante dentro de los FAFA es la inoculación con lodos activados por 14 días, previos al tratamiento de agua; esto reduce el tiempo de tratamiento a 3 días, usándolos en aguas residuales de mataderos avícolas [9]. Se ha observado, un efecto del tipo de piedra volcánica usada en el tratamiento de agua residual, por ejemplo, se evaluaron: basalto afanítico, basalto porfídico, escoria volcánica y la mezcla de las 3 rocas volcánicas; el mejor resultado obtenido fue en el filtro de escoria volcánica con un (TRH) de 18 horas y un porcentaje de 74,33 % de remoción de DQO y con la escoria volcánica con un 55,72 % [10].

Entre las alternativas de filtración, se ha empleado piedra pómez y escoria volcánica como medios de soporte en tanques de filtración, logrando en un tiempo de retención de 72 horas, una remoción de DBO del 62 % con la piedra pómez y respecto a la DQO, una remoción de 54 % con la escoria [11]. De igual manera, se ha estudiado en modelo a escala laboratorio, como es el caso de filtros con tubos de PVC donde se ha utilizado la piedra pómez, reportando una remoción de 75% y 39 % para la DBO y DQO, respectivamente [12]. Asimismo, el estudio de Ahmed & Farooq que empleó piedra volcánica, reportó una notable remoción de DBO y DQO del 96% y 99%, respectivamente, lo cual nos demuestra que la piedra volcánica puede ser una

herramienta aplicable en el tratamiento de aguas residuales [13]. La piedra volcánica es rica en óxidos de hierro, lo cual le permite aumentar la capacidad de adsorción de DQO [14].

Por lo anteriormente expuesto, se pretende evaluar el efecto de la granulometría y del porcentaje de dilución en la remoción de la materia orgánica de agua residual de matadero avícola mediante un filtro de piedra volcánica; con ello, brindar una mejor alternativa de tratamiento de estas aguas residuales, minimizando el impacto ambiental y promoviendo la sostenibilidad.

II. Materiales y Métodos

A. *Muestra*

El agua residual proveniente de un matadero avícola, ubicado en el distrito y provincia de Callao y departamento de Lima (11°59'48.18"S 77° 4'33.78"O), tuvo un volumen de 15 L.

La piedra volcánica (Fig. 1) se recolectó de las faldas del volcán Jenchana, localizado en el Distrito de Andagua, provincia de Castilla, región de Arequipa (15°31'6,64"S 72°20'46,68" O).



Fig. 1. Muestra de piedra volcánica

B. *Procedimiento experimental*

Se aplicó el diseño factorial 3^k, se consideraron 2 factores (k = 2) y 2 repeticiones por tratamiento, y se obtuvo 18 corridas en total. En la Tabla I, se muestran los niveles de los parámetros de operación del filtro experimental.

TABLA I
PARÁMETROS DE OPERACIÓN DEL FILTRO DE PIEDRA VOLCÁNICA

Parámetros de operación	**Mínimo**	**Medio**	**Máximo**
Granulometría (mm) (X_1)	Fina $\bar{x}$ =15,65	Media $\bar{x}$ = 28,15	Gruesa $\bar{x}$ = 37,50
Dilución (%) (X_2)	40	60	100

Las variables respuestas en la investigación fueron: el porcentaje de remoción de DBO_5 (Y_1), de DQO (Y_2), de turbidez (Y_3), de conductividad eléctrica (Y_4) y pH final (Y_5).

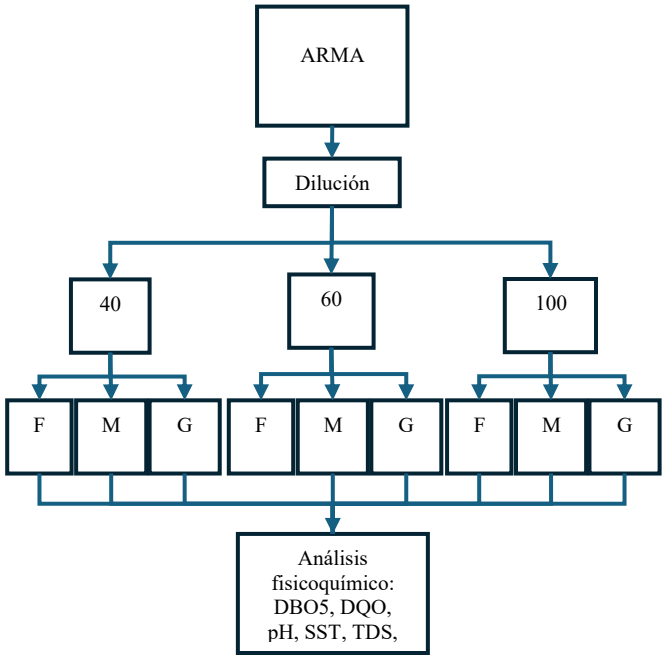


Fig. 2. Esquema experimental. Granulometría: Fina (F), Mediana (M) y Gruesa (G).

C. *Análisis granulométrico*

El análisis granulométrico se llevó a cabo en el laboratorio de Mecánica de Suelos de la Universidad Nacional de Ingeniería, Lima, Perú. Se usó una muestra de 20,312 kg de piedras volcánicas. Se obtuvo: Grava (90%), Arena (9%) y Finos (1%). El tamaño fue de D_{50} (mm): 23.5 (Tabla II).

D. *Determinación de la demanda bioquímica de oxígeno*

La demanda bioquímica de oxígeno (DBO_5) de la solución experimental se determinó con el método estándar, en un sistema para análisis de la demanda bioquímica de oxígeno (modelo BOD TRACK II, serie 1808C008294, HACH, USA) [15] (APHA 5210 B).

E. *Demanda química de oxígeno (DQO)*

Se utilizó un termo reactor (CR25 COD, Rocker Scientific, Taiwan) para la digestión de las muestras, así como un espectrofotómetro (DR1900, HACH, USA) y viales de digestión de alto rango. El método empleado fue de reflujo cerrado que evita pérdida de vapor y asegura las condiciones controladas del proceso. Se recolectó 100 mL de muestra de lixiviado, y se diluyó 1:20, y en el termo reactor se precalentó a 150 °C, retirando el tapón del vial, luego se añadió 2,5 mL de la muestra utilizando una micropipeta, y se preparó un vial en blanco añadiendo 2,5 mL de agua desionizada. Los viales se cerraron y se mezclaron suavemente; a continuación, se procedió a colocarlos en el termorreactor para la digestión de los viales, durante 2 horas a 150 °C. Después, se enfriaron los viales en el reactor durante 20 minutos, se colocaron en una gradilla y se dejaron enfriar a temperatura ambiente. En el espectrofotómetro se obtuvo el resultado en mg O_2/L [16].

TABLA II
ANÁLISIS GRANULOMÉTRICO POR TAMIZADO – REFERENCIA ASTM D D6913/D6913M-17

TAMIZ	ABERTURA (MM)	RETENIDO PARCIAL (%)	% ACUMULADO	
			RETENIDO	PASA
3”	75000	-	-	-
2”	50000	-	-	100
1 ½”	37500	1	1	99
1”	25000	43	44	56
¾”	19000	24	68	32
½”	12500	13	81	19
3/8”	9500	4	85	15
¼”	6300	4	89	11
N° 04	4750	1	90	10
N° 10	2000	3	94	6
N° 20	0,850	2	96	4
N° 30	0,600	1	96	4
N° 40	0,425	1	97	3
N° 60	0,250	1	98	2
N° 100	0,150	0	98	2
N° 140	0,106	0	98	2
N° 200	0,075	0	99	1
FONDO		1		

F. Determinación de sólidos suspendidos totales

Con respecto a los sólidos suspendidos totales (SST) se utilizó un frasco de plástico de 250 ml lleno con la muestra; la metodología para este parámetro fue de los sólidos suspendidos totales secos a 103-105º C [17].

G. Determinación de sólidos suspendidos totales

Las mediciones de sólidos totales disueltos (TDS) se realizaron utilizando un equipo multiparámetro de la marca Oaklon, modelo PCTS 50. Los TDS representan la concentración total de sustancias disueltas en el agua. Se compone de sales inorgánicas, así como una pequeña cantidad de materia orgánica [18].

H. Determinación de la conductividad eléctrica

Se usó un multímetro portátil (HQ40D, Hanna, USA) previamente calibrado a 0 µS/cm con agua destilada o una solución estándar de KCl (el valor medido debe resultar 1413 µS/cm). Luego de ello, se colocó la muestra en un vaso precipitado de 100 mL. Se realizó la medición por triplicado, luego, se lavó los electrodos con agua destilada después de cada medición y secó con papel absorbente [18].

I. Determinación del pH

Se usó un multímetro portátil (HQ40D, Hanna, USA) previamente calibrado con soluciones patrón (normalmente con la de pH 4.0, 7.0 y 10.0). Luego de ello, se colocó la muestra de agua en un vaso precipitado plástico de 100 mL. Se sumergió el electrodo hasta que las áreas del sensor estén sumergidas completamente y esperamos a que la lectura se estabilice. Se leyó el pH de la muestra y se anotó. Se realizó la medición por triplicado, luego, se lavó los electrodos con agua destilada después de cada medición y secó con papel absorbente [18].

J. Determinación del porcentaje de remoción

Se determinó el porcentaje de remoción (%R) del filtro de piedra volcánica para los cinco parámetros de forma individual, para lo cual se emplea la ecuación (1).

$$\%R = \frac{(S_i - S_f)}{S_i} * 100 \qquad (1)$$

Dónde:

%R: Eficiencia de remoción

S_i: Carga contaminante de entrada

S_f: Carga de Contaminante de salida

K. Análisis estadístico

Se aplicó estadística descriptiva para elaborar las tablas de resultados con media ($\bar{x}$) y desviación estándar (σ). Se aplicó estadística inferencial para estimar la normalidad y la homogeneidad de varianzas, así como el análisis de varianza para un diseño factorial, y la prueba de Tukey, usando el software Minitab en versión de prueba y MS Excel.

II. RESULTADOS

La muestra de agua residual de matadero avícola (ARMA) presentó niveles por encima de los límites máximos permisibles (LMP) de DBO_5 (máx. 50 mg/L), DQO (máx. 110 mg/L), SST (máx. 50 mg/L), solo el pH estuvo dentro del rango permitido (6.0–9.0) [19] (Tabla II).

La muestra ARMA filtrada con piedra volcánica aún siguió presentando niveles por encima de los límites máximos permisibles (LMP) de DBO_5 y DQO [19] (Tabla IV), aunque es resaltable que se obtuvo una remoción de DBO5 de 20.29–61.60% y de DQO de 11.60–56.91% (Tabla IV).

A diferencia de los resultados de la Tabla III, en la Tabla IV se observa que la muestra ARMA filtrada con piedra volcánica presenta niveles por debajo de los límites máximos permisibles (LMP) de SST, TDS y pH [19].

TABLA III
CARACTERÍSTICAS FISICOQUÍMICAS INICIALES DE AGUA RESIDUAL

Parámetros	Unidad	Valor Promedio
DBO_5	mg/L	1463,7
DQO	mg/L	2392,2
pH	Adimensional	7,4
SST	mg/L	469
TDS	mg/L	944,84
Conductividad	µS/cm	1889,68

Se pueden observar porcentajes de remoción interesantes, sobre todo en cuanto a DBO_5 (20,29–61,60%), DQO (11,60–56,91%), SST (56,93–81,88%), TDS (20,36–68,83%). Más adelante se discute la relevancia de estos hallazgos.

El Análisis de Varianza para el diseño factorial 3^k (Tabla VI), para las variables de respuesta después de la filtración con piedra volcánica, presenta efectos significativos ($p < 0,05$) de los factores estudiados. El Factor A (Granulometría) tuvo un efecto significativo sobre SST y TDS. El Factor B (Dilución) presentó un efecto significativo sobre todas las variables respuesta. La interacción A x B tuvo un efecto significativo sobre la DBO_5 y TDS. El coeficiente de determinación (R^2)

ajustado y sin ajustar fue bueno (85.51–99.99%) [20]. Esto determinó la búsqueda de los valores óptimos de las variables independientes que permitan las máximas remociones.

TABLA IV
DATA DE DBO_5 Y DQO

X1	X2	DBO_5	DQO
		(mg/L)	
16,65	40	593,8 ± 36,4 ^{ef}	1129,7 ± 8,69 ^{c}
16,65	60	745,0 ± 19,09 ^{cd}	1316,8 ± 299 ^{bc}
16,65	100	1143,4 ± 33,02 ^{a}	2060,6 ± 76,3 ^{a}
28,15	**40**	**589,5 ± 38,9** ^{f}	**1032,9 ± 2,82** ^{c}
28,15	60	803,3 ± 30,7 ^{c}	1335,7 ± 54,5 ^{bc}
28,15	100	1012,7 ± 48,6 ^{b}	1813,9 ± 32,7 ^{ab}
37,50	40	665,0 ± 9,9 ^{def}	1150,2 ± 163 ^{c}
37,50	60	713,5 ± 24,0 ^{cde}	1403,1 ± 221 ^{bc}
37,50	100	1011,1 ± 18,9 ^{b}	1991,2 ± 153 ^{a}

^{a,b,c,d,e,f} Letras diferentes indican diferencias significativas en las columnas
X_1: Granulometría (mm); X_2: Dilución (%)

TABLA V
DATA DE SST, TDS Y PH FINAL

X1	X2	SST	TDS	pH
		(mg/L)		
16,65	40	91,5 ± 2,1 ^{c}	**294,8 ± 0,3** ^{g}	6,7 ± 0,0
16,65	60	181,0 ± 2,8 ^{ab}	423,5 ± 0,7 ^{d}	6,7 ± 0,0
16,65	100	182,5 ± 3,5 ^{a}	586,0 ± 2,1 ^{c}	6,8 ± 0,2
28,15	**40**	**86,0 ± 1,4** ^{c}	307,3 ± 1,1 ^{f}	6,6 ± 0,1
28,15	60	121,0 ± 45 ^{bc}	422,0 ± 0,7 ^{d}	**6,5 ± 0,1**
28,15	100	191,5 ± 0,7 ^{a}	620,0 ± 4,9 ^{b}	6,7 ± 0,2
37,50	40	101,5 ± 2,1 ^{c}	319,5 ± 0,0 ^{e}	6,6 ± 0,0
37,50	60	186,5 ± 0,7 ^{a}	423,5 ± 0,7 ^{d}	6,6 ± 0,0
37,50	100	201,0 ± 1,4 ^{a}	750,3 ± 3,2 ^{a}	6,8 ± 0,0

^{a,b,c,d,e,f} Letras diferentes indican diferencias significativas en las columnas
X_1: Granulometría (mm); X_2: Dilución (%)

TABLA VI
DATA DE PORCENTAJE DE REMOCIÓN DE DBO_5, DQO, SST Y TDS

X1	X2	DBO_5	DQO	SST	TDS
16,65	40	61,19	52,52	80,17	68,78
16,65	60	50,02	53,81	60,98	55,23
16,65	100	**20,29**	**11,60**	60,55	38,14
28,15	40	54,09	56,74	78,04	66,18
28,15	60	52,42	47,88	60,13	55,23
28,15	100	29,97	12,25	57,36	20,83
37,50	40	**61,60**	**56,91**	81,45	67,56
37,50	60	46,61	42,55	67,38	55,28
37,50	100	28,47	25,14	59,28	34,75
16,65	40	57,68	53,03	80,81	**68,83**
16,65	60	48,18	36,10	61,83	55,12
16,65	100	23,48	16,12	61,62	37,82
28,15	40	55,05	47,10	78,68	66,18
28,15	60	50,09	34,82	60,34	55,12
28,15	100	31,88	21,28	**56,93**	**20,36**
37,50	40	57,85	56,74	**81,88**	67,40
37,50	60	43,64	45,78	81,02	55,39
37,50	100	33,16	23,21	59,06	34,01

X_1: Granulometría (mm); X_2: Dilución (%)

TABLA VII
ANÁLISIS DE VARIANZA PARA EL DISEÑO FACTORIAL 3^K PARA LOS PORCENTAJES DE REMOCIÓN Y PH FINAL

Fuente	DBO_5	DQO	SST	TDS	pH
Factor A	0,237	0,345	0,022*	0,000*	0,196
Factor B	0,000*	0,000*	0,000*	0,000*	0,033*
A x B	0,003*	0,800	0,062	0,000*	0,516
R^2 (%)	98,67	92,33	94,64	99,99	66,17
R^2 ajustado (%)	97,50	85,51	89,88	99,98	69,09

*Significativo a α = 0,05
Factor A: Granulometría, **Factor B:** Dilución

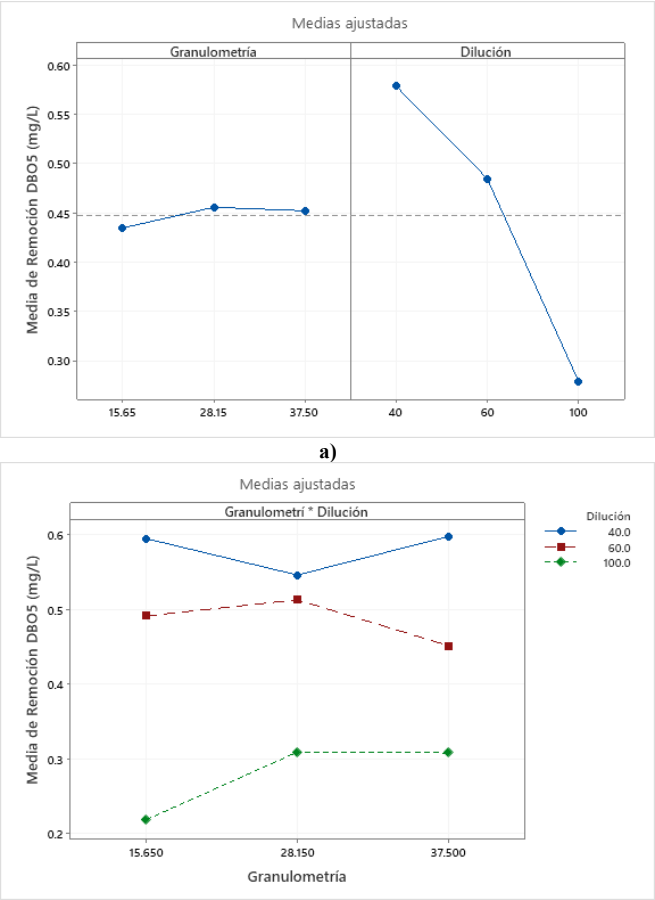
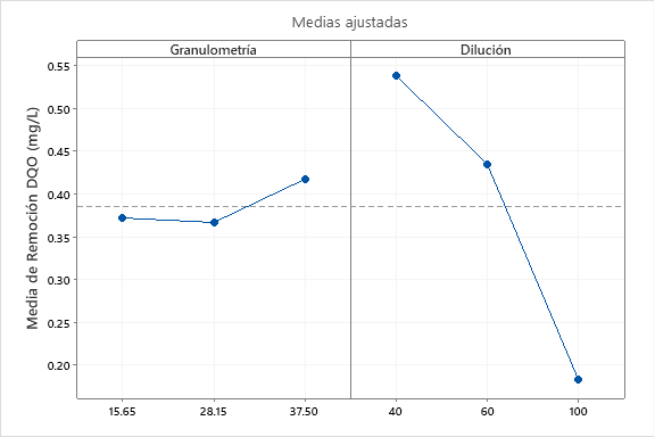


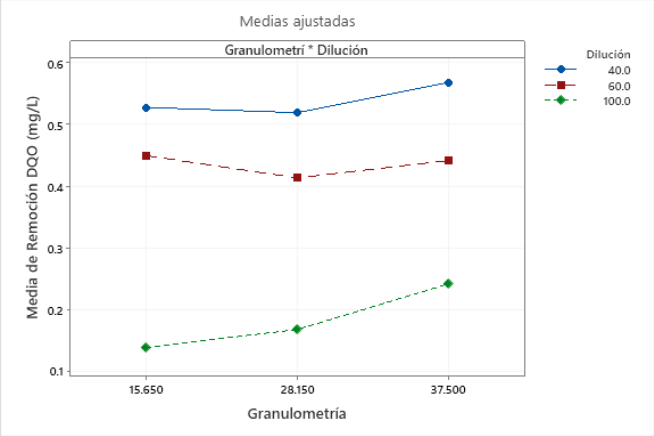
Fig. 3. Gráfica de remoción de DBO_5 (Demanda bioquímica de oxígeno). a) Efectos principales, b) Interacción.

El porcentaje de remoción de DBO_5 presentó una relación inversamente proporcional a la dilución del ARMA (Fig. 3a). La interacción de la granulometría y la dilución mejoró a una dilución de 40 % (Fig. 3b). El porcentaje de remoción de DBO_5 estuvo entre 20,29% y 61,60%. para lograr concentraciones menores de DBO_5 y DQO. La dilución permite obtener menores concentraciones iniciales de DBO_5 y DQO [21] y, por lo tanto, una mayor remoción al final del proceso de filtración. El porcentaje de remoción de DQO presentó una relación inversamente proporcional a la dilución del ARMA (Fig. 4a), de manera similar a la DBO_5. La interacción de la granulometría y la dilución no se observa

gráficamente (Fig. 4b), lo que confirma que ambas variables pueden operar de manera independiente. El porcentaje de remoción de DQO estuvo entre 11,60% y 56,91%, y el máximo valor fue mayor en comparación con un filtro de piedra volcánica llamada "tezontle" que obtuvo un porcentaje de remoción de 26,10% - 49,70% de DQO [9]. La piedra volcánica ha mostrado una notable eliminación de la demanda biológica de oxígeno (96%) y de la demanda química de oxígeno (99%) para algunos casos de aguas residuales, por lo que se puede introducir como una herramienta para el tratamiento avanzado de aguas residuales [13].



a)

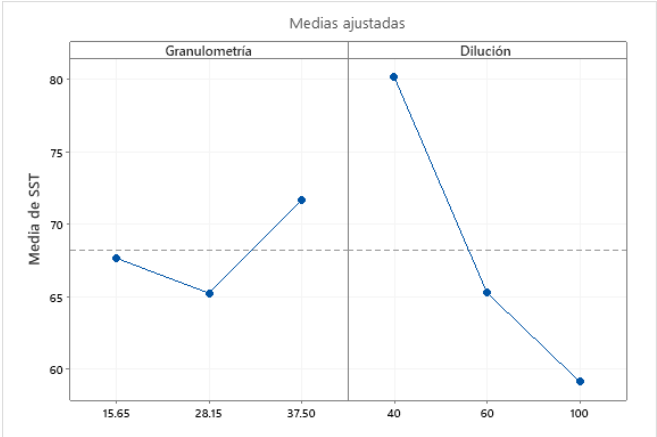


b)

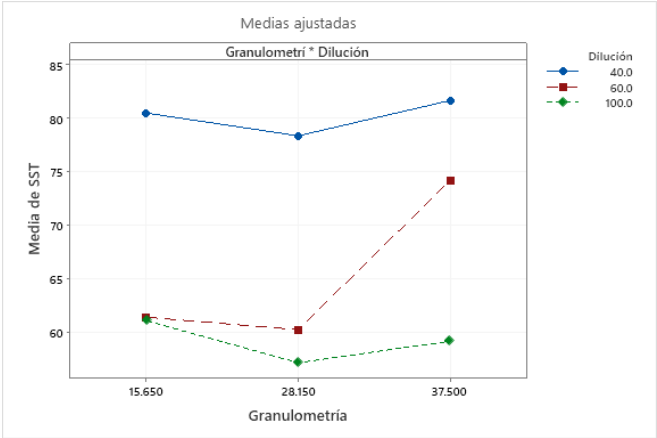
Fig. 4. Gráfica de remoción de DQO (Demanda química de oxígeno). a) Efectos principales, b) Interacción.

Otra variable respuesta fue el porcentaje de remoción de TSS, con una concentración de 469 mg/L, que fue menor a la registrada por Beristain et al. (1250 mg/L) [9] y Yaakob et al. (3438 mg/L) [22], para efluentes avícolas.

Por otro lado, el porcentaje de remoción de SST mostró una relación directa con la granulometría, pero indirecta con la dilución (Fig. 5a). Sin embargo, según los resultados, no existe interacción entre ambas variables para mejorar la remoción (Fig. 5b). Este hallazgo impulsa la recomendación de usar piedra volcánica para tratar el efluente avícola que proviene de la limpieza del estómago del pollo, mucosa intestinal, alimento sin digerir, sangre, plumas y carne y pellejos sueltos [3], y de esta manera reducir significativamente su carga de SST.



a)



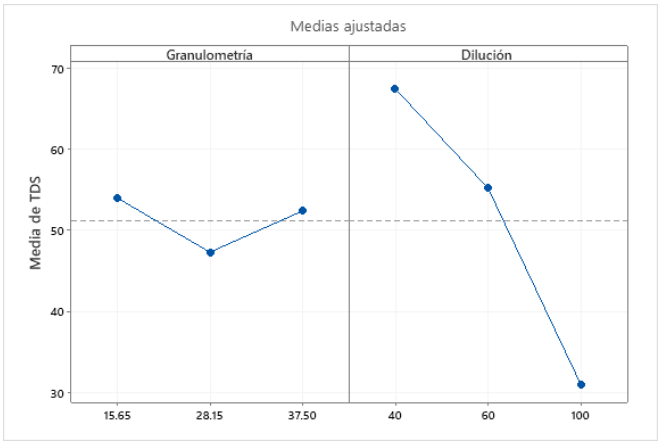
b)

Fig. 5. Gráfica de remoción de SST (Sólidos suspendidos totales). a) Efectos principales, b) Interacción.

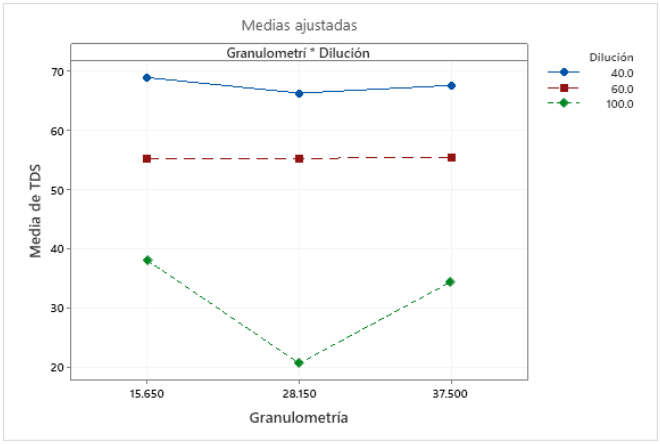
El porcentaje de remoción de sólidos disueltos totales (TDS) fue la única variable respuesta que se vio afectada por la granulometría, la dilución y la interacción de ambos ($p < 0,05$). Con respecto a la granulometría, se observa mejor comportamiento a tamaños pequeños y grandes, como se muestra en la interacción (Fig. 6b), y en cuanto a la dilución, guarda una relación indirecta (Fig. 6a).

La remoción de TDS estuvo en un rango de 20,36–68,83%, el mismo que fue inferior al reportado por Jaramillo en su trabajo de investigación con piedra volcánica (80%) [8]. Un filtro de piedra volcánica para el tratamiento de agua residual de matadero avícola es importante su tamaño, porosidad y su estructura interna que proporciona una alta capacidad de adsorción [23]. Es importante la capacidad de superficie específica de la piedra volcánica de tamaños de 2" a 4". en promedio [7], en este trabajo fue de ¼" a 2". Se recomienda un proceso de prelavado de piedra volcánica para mejorar en su eficiencia de remoción un 18% en cuanto a

remoción de TDS [13]. La Fig. 7, mostró el efecto de las variables sobre el pH. Se observa que solo el factor B (Dilución) tiene un efecto significativo sobre el pH, puesto que los ácidos que conforman la muestra impactan en la concentración de H^+.



a)

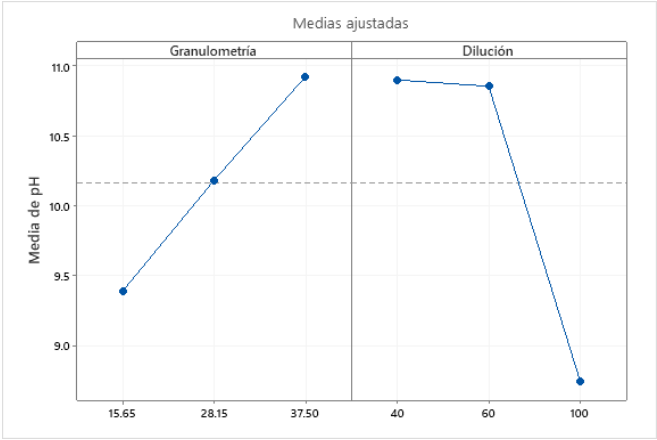


b)

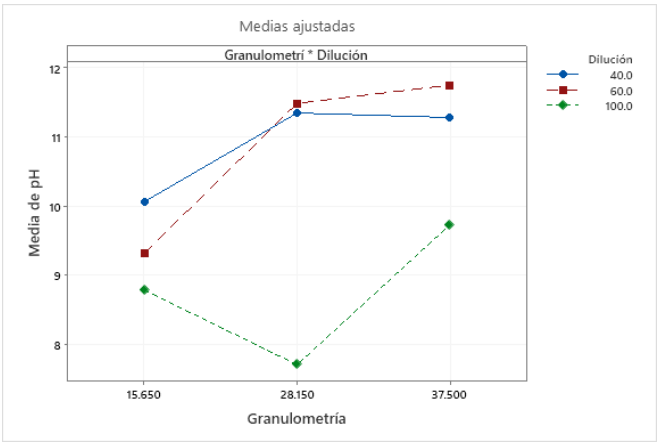
Fig. 6. Gráfica de remoción de TDS (Sólidos totales disueltos). a) Efectos principales, b) Interacción.

Es importante la capacidad de superficie específica de la piedra volcánica de tamaños de 2" a 4" en promedio [7]; en este trabajo fue de ¼" hasta 2". El sólido disuelto consiste en sales metálicas solubles como calcio, ferroso, sodio, magnesio, potasio, etc. [24]. La piedra volcánica tiene una alta relación área/volumen, buena resistencia mecánica, alta porosidad natural, resistencia relativa [25], y abundancia, especialmente en varias regiones de Arequipa, Perú; y tiene una gran capacidad de captar estos TDS.

En este trabajo se utilizó una función de deseabilidad unilateral con las respuestas a maximizar (Tabla VI): remoción de DBO_5 (59,73%), de SST (81,66%) y de TDS (67,48%) junto con sus valores de deseabilidad individual. Las soluciones de optimización de granulometría (37.5 mm) y dilución (40%). Se puede observar que la deseabilidad individual y compuesta es muy buena, puesto que debe aproximarse a 1 [20].



a)



b)

Fig. 7. Gráfica de pH final. a) Efectos principales, b) Interacción.

TABLA VIII
OPTIMIZACIÓN MULTIRRESPUESTA

Granulometría		**Dilución**	**Deseabilidad global**
A: 37,5 mm		B: 40%	0,9726
Variable respuesta	**Valor predicho**	**Deseabilidad Individual**	**Objetivo**
DBO_5	59,73	0,9545	Maximizar
SST	81,66	0,9914	
TDS	67,48	0,9721	
DQO	-	-	No optimizar
pH	-	-	No optimizar

IV. CONCLUSIONES

Los resultados de las pruebas numéricas son consistentes con el comportamiento experimental del filtro y reflejan la efectividad del geomaterial basado en piedra volcánica para el tratamiento de aguas residuales provenientes de mataderos avícolas.

AGRADECIMIENTO

Los autores agradecen el patrocinio de la Universidad Privada del Norte por hacer posible esta publicación.

REFERENCIAS

[1] CEPLAN, Estudio prospectivo sobre el estrés hídrico y la inseguridad alimentaria en el Perú, Centro Nacional de Planeamiento Estratégico (2023). https://cdn.www.gob.pe/uploads/document/file/5511475/4909702-estudio-prospectivo-de-estres-hidrico-e-inseguridad-alimentaria-ceplan.pdf (accessed December 15, 2024).

[2] A.D. Bustos Gómez, V.A. Guáqueta Villalobos, Diseño de un proceso químico para la remoción de exceso de nitratos presentes en el agua de la fuente hídrica del Río Subachoque., (2022).

[3] E. Bazrafshan, F. Kord Mostafapour, M. Farzadkia, K.A. Ownagh, A.H. Mahvi, Slaughterhouse Wastewater Treatment by Combined Chemical Coagulation and Electrocoagulation Process, PLoS One 7 (2012) e40108. https://doi.org/10.1371/journal.pone.0040108.

[4] A. Al-Gheethi, N.L. Ma, P.F. Rupani, N. Sultana, M.A. Yaakob, R.M.S.R. Mohamed, C.F. Soon, Biowastes of slaughterhouses and wet markets: an overview of waste management for disease prevention, Environmental Science and Pollution Research (2021) 1–14.

[5] SUNASS, Diagnóstico de las plantas de tratamiento de aguas residuales, Ministerio de Vivienda Construcción y Saneamiento (2019). https://www.oefa.gob.pe/wp-content/uploads/2016/10/4.-Rol-de-la-SUNASS-ante-la-problem%C3%A1tica-generada-por-aguas-residuales..pdf (accessed December 15, 2024).

[6] V. Vásconez, Análisis de la piedra pómez como filtro en el tratamiento de aguas residuales provenientes del centro de faenamiento Ocaña del Cantón Quero, Tesis de pregrado, Universidad Técnica de Ambato, 2017. http://repositorio.uta.edu.ec/handle/123456789/27232 (accessed December 15, 2024).

[7] Z. Huamaní, Estudio de coeficientes cinéticos de filtros percoladores por etapas, con medio filtrante de piedra volcánica, Tesis magistral, Universidad San Carlos de Guatemala, 2018. http://www.biblioteca.usac.edu.gt/tesis/08/08_0646_MT.pdf (accessed February 3, 2025).

[8] A. Jaramillo, J. Paredes, Evaluación de la eficiencia de un sistema de dos filtros percoladores en serie para el tratamiento de aguas residuales domésticas en la urbanización Santa Lucía–Morales, 2018, Tesis de pregrado, Universidad Peruana Unión, 2019. https://repositorio.upeu.edu.pe/items/a8a62cb0-77fb-4ccd-b381-dbe1e4ae9fbc (accessed February 16, 2025).

[9] B. Beristain-López, C.A. Sosa-Villalobos, S. Partida-Sedas, I. Galaviz-Villa, Efficiency of an upflow anaerobic filter for poultry effluent treatment, Agrociencia (2024). https://doi.org/10.47163/agrociencia.v58i1.2730.

[10] T. Mejía, Aplicación de filtros anaerobios de flujo ascendente en la tratabilidad de aguas residuales domesticas generadas en Puerto Ayora Isla Santa Cruz Provincia de las Galápagos, Tesis de pregrado, Universidad Politécnica Salesiana, 2024. https://dspace.ups.edu.ec/handle/123456789/27481 (accessed February 3, 2025).

[11] M.B. Aregu, S.L. Asfaw, M.M. Khan, Identification of two low-cost and locally available filter media (pumice and scoria) for removal of hazardous pollutants from tannery wastewater, Environmental Systems Research 7 (2018) 10. https://doi.org/10.1186/s40068-018-0112-2.

[12] H. Sholehah, T. Abdullah, Azwarudin, S. Aprianti, Using pumice as an alternative to reduce biological oxygen demand and chemical oxygen demand in tough waste, Jurnal Pijar Mipa 18 (2023) 1034–1039. https://doi.org/10.29303/jpm.v18i6.5989.

[13] A.T. Ahmed, Q.U. Farooq, Experimental and computational analysis for advanced wastewater treatment by volcanic rocks, Water Environment Research 95 (2023). https://doi.org/10.1002/wer.10919.

[14] Z. Lin, H. Yang, H. Chen, Z. Liu, X. Ouyang, A Novel Structure Applied to the Permeable Brick Paving System and its Decontamination Performance, Pol J Environ Stud 29 (2020) 4213–4223. https://doi.org/10.15244/pjoes/118889.

[15] K. Nielson, D.W. Smith, Ozone-enhanced electroflocculation in municipal wastewater treatment, Journal of Environmental Engineering and Science 4 (2005) 65–76. https://doi.org/10.1139/s04-043.

[16] F.P. Liu, J. Xu, J.X. Zhao, L.F. Liu, M.Y. Zhang, S.C. Tan, An experimental study on water purification performance of modified volcanic rock ecological concrete, Sci Rep 15 (2025) 1092. https://doi.org/10.1038/s41598-024-82315-9.

[17] N. Basurto-Flores, N. Medina-Guerrero, Evaluación técnico-económica del uso de biopolímeros para el tratamiento de aguas residuales de curtiembres., Revista de Ciencias Ambientales 57 (2023) 1–25. https://doi.org/10.15359/rca.57-2.2.

[18] P.J. Fragoso-Castilla, L.A. Rubiano, J.J. Kerguelen, Análisis de variables fisicoquímicas en el proceso de remoción de coliformes en el sistema de lagunas de oxidación, Salguero, Valledupar (Colombia), Información Tecnológica 32 (2021) 113–122. https://doi.org/10.4067/S0718-07642021000100113.

[19] MINAM, Resolución Ministerial N° 049-2025-MINAM, aprueba los Límites Máximos Permisibles (LMP) para efluentes de los mataderos y centros de faenamiento avícola y su Exposición de Motivos (2025). https://www.gob.pe/institucion/minam/normas-legales/7572000-00049-2025-minam (accessed February 21, 2025).

[20] H. Gutiérrez Pulido, R. de la Vara Salazar, Análisis y diseño de experimentos, 2nd ed., Mc Graw Hill - Interamericana, México DF, 2008.

[21] Z. Bakari, A. El Ghadraoui, N. Boujelben, M. Del Bubba, B. Elleuch, Assessment of the impact of irrigation with treated wastewater at different dilutions on growth, quality parameters and contamination transfer in strawberry fruits and soil: Health risk assessment, Sci Hortic 297 (2022) 110942. https://doi.org/10.1016/j.scienta.2022.110942.

[22] M.A. Yaakob, R.M.S.R. Mohamed, A.A.S. Al-Gheethi, A.H.M. Kassim, Characteristics of chicken slaughterhouse wastewater, Chem Eng Trans 63 (2018) 637–642. https://doi.org/10.3303/CET1863107.

[23] A.T. Ahmed, H. Almohamadi, Chemical and microstructural studies for using natural zeolite in advanced wastewater treatment, International Journal of Environmental Science and Technology 20 (2023) 6491–6498. https://doi.org/10.1007/s13762-022-04384-5.

[24] A. Azanaw, B. Birlie, B. Teshome, M. Jemberie, Textile effluent treatment methods and eco-friendly resolution of textile wastewater, Case Studies in Chemical and Environmental Engineering 6 (2022) 100230. https://doi.org/10.1016/j.cscee.2022.100230.

[25] J.M. Morgan-Sagastume, A. Noyola, Evaluation of an aerobic submerged filter packed with volcanic scoria, Bioresour Technol 99 (2008) 2528–2536. https://doi.org/10.1016/j.biortech.2007.04.068.