Sociedad Mexicana de Ciencia y Tecnología Agropecuaria ISSN: 2448-6620

EVALUACIÓN COMPARATIVA DE EFECTOS DE DIFERENTES FILTROS HÍDRICOS PARA UN MEJOR REPROCESAMIENTO Y MAYOR CALIDAD DEL AGUA

Guillermo Enrique Cruz Nicanor[1]; Arturo Guadalupe Vera Rivera[2]; Luis A. Ramírez Pulquero[1]; Jesús David Joaquín Cuarenta[2], Berenice Rivera Cortez[3], Davino Pérez Mendoza[3], José Gómez Espinoza[1]*

[1]Ingeniería en Innovación Agrícola Sustentable, [2]Ingenieria en Hidrológica, TecNM-campus Roque, Carretera Celaya-Juventino Rosas, km 8, CP 38110, México, Maestría en Tecnología Informática Educativa, Universidad Autónoma de Zacatecas, CP. 98000, México Autor de correspondencia: gomez2205jge@gmail.com

RESUMEN

Los sistemas de recirculación acuícola (RAS) requieren de una filtración eficiente que combine la remoción mecánica de sólidos con la transformación biológica de compuestos nitrogenados tóxicos. El objetivo de este estudio fue evaluar la eficiencia de cuatro configuraciones de filtración grava (TRAT 1), malla (TRAT 2), tezontle (TRAT 3) y un diseño mixto en gradiente con grava gruesa, tezontle y grava fina (TRAT 4) frente a un testigo sin filtrar (TRAT 5), sobre los parámetros fisicoquímicos del agua (pH, conductividad, sedimentos, nitratos y nitritos). Se implementó un diseño experimental con siete fechas de muestreo y tres repeticiones, analizado mediante ANOVA bifactorial y prueba de Tukey (α=0.05). La interacción Fecha × Tratamiento fue altamente significativa ($p<0.01$) para todas las variables. El filtro mixto (TRAT 4) demostró el mejor desempeño integral al reducir los sedimentos en un 84% respecto al testigo (5.15 vs. 32.31 mg/L) y alcanzar la mayor producción de nitratos (52.14 ppm), indicador de una actividad nitrificante robusta. Se concluye que un diseño en gradiente con materiales complementarios ofrece una solución técnicamente superior para el tratamiento de agua en RAS.

Palabras clave: *acuacultura, biofiltro, nitrificación, recirculación acuícola, remoción de sólidos*.

ABSTRACT

Recirculating aquaculture systems (RAS) require efficient filtration that combines mechanical solids removal with biological transformation of toxic nitrogenous compounds. The objective of this study was to evaluate the efficiency of four filtration configurations gravel (TRAT 1), mesh (TRAT 2), tezontle (TRAT 3), and a mixed gradient design with coarse gravel, tezontle, and fine gravel (TRAT 4) against an unfiltered control (TRAT 5), on water physicochemical parameters (pH, conductivity, sediments, nitrates, and nitrites). A bifactorial ANOVA and Tukey test (α=0.05) were applied to data from seven sampling dates with three replicates. The Date × Treatment interaction was highly significant ($p<0.01$) for all variables. The mixed filter (TRAT 4) showed the best overall performance, reducing sediments by 84% compared to the control (5.15 vs. 32.31 mg/L) and achieving the highest nitrate production (52.14 ppm), indicating robust nitrifying activity. It is concluded that a gradient design with complementary materials offers a technically superior solution for water treatment in RAS.

Keywords: *aquaculture, biofilter, nitrification, recirculating aquaculture, solids removal*

INTRODUCCIÓN

Los sistemas de recirculación acuícola (RAS) permiten optimizar el uso del agua en acuacultura al reutilizarla disminuye de manera importante el consumo de agua dulce. (Ruiz, 2021), dentro de estos sistemas la filtración juega un papel esencial, ya que elimina las impurezas del agua y optimiza las acondiciones para su postratamiento (García, 2024), por otra parte, los filtros se han consolidado como una actividad primaria de gran relevancia en México, ha sido una adopción técnica gradual que se aceleró a partir de los años 80, se ha consolidado en décadas recientes (IMIPA, 2025).

En el Instituto Tecnológico Nacional de México Campus Roque está establecido un sistema intensivo de producción la tilapia del Nilo (*oreochromis niloticus*) la más popular por su rápido crecimiento y rusticidad, en un estanque bien manejado puede alcanzar su peso comercial de 500 gramos en un periodo de 5 a 7 meses con buena alimentación, temperatura estable, además se deben considerar también los siguientes factores, manejo de sexo, los machos crecen más rápido y grandes que las hembras por tal motivo en el cultivo comercial se usan poblaciones monosexuales para evitar la sobrepoblación por reproducción y enfocar la energía en el crecimiento y niveles de oxígeno no menor de 3.5 mg/L para evitar que el pez se estrese y muera (Rivera Cortez et al., 2025).

El invernadero está compuesto por dos estanques circulares de geomembrana ubicados dentro del invernadero y alimentados con agua de pozo, las tareas principales del sistema son la nutrición, el manejo de los peces, el seguimiento continuo de los parámetros climáticos y de la calidad del agua, lo que ayuda a preservar esta última sin necesidad de renovaciones frecuentes con agua de pozo. Actualmente, cada tres días se descargan 2800 litros de agua de recambio/descarga, con altas concentraciones de compuestos nitrogenados (amoniaco, nitritos y nitratos), esta práctica genera un problema ambiental dentro de la unidad, ya que dichas aguas se vierten sin tratamiento. La implementación de sistemas RAS representa una estrategia clave para optimizar el uso del agua, al permitir su reutilización y reducir significativamente el volumen total consumido (Rivera, 2025).

En relación con sistemas de filtración eficientes resulta fundamental para mejorar la calidad del efluente y hacerlo viable para su reutilización en agricultura, mitigando así el impacto ambiental, a pesar de los avances en el conocimiento de los biofiltros existe poca información comparativa sobre el desempeño simultaneo de diferentes sustratos en las funciones mecánica y biológica dentro de un mismo sistema experimental. La eficiencia de cuatro sistemas de filtración, grava, malla, tezontle y un diseño mixto en gradiente frente a un testigo sin filtrar, sobre los parámetros fisicoquímicos del agua (pH, conductividad, sedimentos, nitratos y

nitritos) a lo largo de un mes, para identificar el tratamiento que ofrezca el mejor balance entre remoción mecánica de sólidos y actividad biológica nitrificante, los resultados obtenidos con estos filtros por medio del método de ANOVA, cuadrados medios y medias, en un sistema de recirculación y filtrados físicos orientado a la extracción de sedimentos, con la finalidad de impulsar la recirculación por medio de uso de filtros para un mejor aprovechamiento del líquido vital. Por lo cual, el objetivo del presente trabajo fue evaluar la eficiencia de diferentes filtros hídricos para un mejor reprocesamiento y mayor calidad del agua.

MATERIALES Y MÉTODOS

El estudio se llevó a cabo en el área acuícola del Tecnológico Nacional de México Campus Roque (TecNM-Roque), ubicado en el estado de Guanajuato, México 20.583556500427132, -100.82715532276465. Además, se analizaron las muestras tomadas en del el Laboratorio de Aguas y Suelos del instituto. Para ello se recolectaron muestras de aguas de los estanques de tilapia a través de un proceso de filtrado mecánico de las cuales fueron 3 repeticiones de 4 filtros y 1 testigos. Se transportaron al laboratorio de aguas y suelo del campus en recipientes de 1.2L, teniendo en cuenta, se evaluaron 4 configuraciones de filtro y 1 testigo sin filtrar. Todas las configuraciones actúan como filtro mecánico, reteniendo sólidos y biológico, sustrato para bacterias nitrificadas mediante los siguientes tratamientos:

Cuadro 1. Descripción de tratamientos durante el estudio

No	Abreviación	Descripción del tratamiento	Material y cantidad
1	Trat 1	Filtrado con grava gruesa	15 kg de grava gruesa + malla adaptable
2	Trat 2	Filtrado con grava fina	20 kg de grava fina + malla adaptable
3	Trat 3	Filtrado con tezontle	15 kg de tezontle + malla adaptable
4	Trat 4	Filtrado mixto	5 kg grava gruesa, 10 kg tezontle, 5 kg grava fina + malla adaptable
Testigo	Trat 5	Muestra sin tratamiento	Toma de muestra directa (sin filtro)

Trat1= Tratamiento 1; Trat2= Tratamiento 2; Trat3= Tratamiento 3; Trat 4= Tratamiento 4; Trat 5= Tratamiento 5.

La medición de pH y conductividad se realizó con un medidor multiparamétrico calibrado, los sedimentos se cuantificaron por gravimetría tras filtración y secado, para nitritos y nitratos se emplearon kits colorimétricos, introduciendo 5ml de agua en tubos de ensayo con adición de reactivos específicos. La aplicación de datos se extendió durante un mes con dos pruebas semanales resultando en siete fechas de muestreo cada una con tres repeticiones.

Se aplicó un análisis de varianza (ANOVA) bifactorial con un nivel de significancia de 0.5 considerando los factores Fecha (FECH), Tratamiento (TRAT) y su interacción (FECH X TRAT). La comparación de medias se realizó mediante la prueba de Tukey. Todos los análisis se procesaron en el programa InfoStat versión 2020.

Se midieron los siguientes parámetros fisicoquímicos claves para evaluar la eficiencia del sistema, pH, indica la acide o alcalinidad del agua, (COND), conductividad eléctrica, mide la cantidad de sales disueltas cambios bruscos puede indicar contaminación, (SEDI) sedimentos, cuantifica los sólidos en suspensión es el indicador directo de la eficiencia del filtro para retener partículas y clarificar el agua, (NITRA) nitratos, producto final del ciclo del nitrógeno, mide la actividad del filtro biológico su acumulación indica que el proceso de nitrificación está ocurriendo, (NITRI) nitritos, compuestos intermedios y altamente toxico es el parámetro más crítico para evaluar la eficiencia del filtro biológico.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Los cuadrados medios del ANAVA se presentan en el Cuadro 1. Se encontraron diferencias estadísticamente significativas tanto en el factor Fecha como en Tratamiento para las cinco variables analizadas. La interacción FECH × TRAT resultó altamente significativa ($p < 0.01$) en todos los casos, lo que evidencia que el efecto de los tratamientos dependió directamente del momento de muestreo. Este hallazgo coincide con lo reportado por Hassan et al. (2024) y Cissé et al. (2024), quienes también detectaron interacciones significativas entre el tiempo y el tipo de tratamiento al evaluar sistemas de filtración acuícola. El coeficiente de variación fue reducido para pH (2.47%), nitratos (3.15%) y nitritos (6.06%), lo que refleja alta precisión experimental. La variable sedimentos presentó un C.V. mayor (19.51%), atribuible a la heterogeneidad natural de los sólidos en el agua de origen.

Cuadro 1. Cuadrados medios del análisis de varianza para los parámetros fisicoquímicos

FV	pH	Cond	Sedi	Nitra	Nitri
(Fech)	0.25530159**	14834.1333**	202.279325**	15574.2244**	0.12407796**
(Trat)	0.23706048*	4767.5810*	2200.684454**	6588.0141**	0.01644504*
Fech*Trat	0.55899881**	11853.3476**	82.567141**	4625.9036**	0.02557963**
Error	0.04292571	1020.2190	10.98856	1.0833	0.00463975
C.V. (%)	2.467918	4.240689	19.51064	3.154039	6.061313

FV = Fuente de variación, gl = grados de libertad, ** = Diferencia altamente significativa (P ≤ 0.01), ** = Diferencia estadística significativa (P ≤ 0.05), ns = No existe diferencia significativa estadística (P ≥ 0.05), CV (%) = Coeficiente de variación; Fech = Fecha; Trat = Tratamiento; Fech*Trat = Fecha por tratamiento; Cond= Conductividad; Sedi = Sedimentos; Nitra = Nitratos; Nitri=Nitritos.

Los nitratos mostraron la mayor variación temporal: la fecha 4 registró un pico de 105.00 ppm, coincidente con la mayor concentración de nitritos (0.698 mg/L), lo que sugiere un pulso de materia orgánica o una perturbación puntual en el sistema que estimuló transitoriamente la actividad bacteriana. Comportamientos similares de fluctuación temporal fueron documentados por Martínez et al. (2024) en sistemas RAS con biofiltros de múltiples sustratos.

Cuadro 2. Medias por fecha de muestreo

FV	pH	Cond	Sedi	Nitra	Nitri
Fecha					

3	8.1947	a	785.93	b	11.9667	bcd	6.8333	e	0.06399225	c
4	8.3073	ab	739.33	a	13.1667	bc	105.00	a	0.69754841	a
6	8.3200	abc	730.47	a	8.6000	cd	48.5000	b	0.49695225	a
2	8.4220	abc	782.07	b	7.3167	d	39.5000	c	0.14190596	bc
7	8.4647	abc	745.89	ab	19.6167	a	7.0000	e	0.21330225	bc
1	8.4680	bc	704.93	a	15.7167	ab	10.0000	d	0.11915241	c
5	8.5893	c	783.80	b	12.4167	bc	6.0000	e	0.23988225	b

Conductividad (Cond), Sedimentos (Sedi), Nitratos (Nitra), Nitritos (Nitri). Letras distintas en la misma columna indican diferencias significativas (Tukey α 0.05).

El pH exhibió un rango de fluctuación entre 8.19 y 8.59, con diferencias estadísticamente significativas entre fechas de muestreo, correspondiendo el valor máximo a la fecha 5 (8.58) y el mínimo a la fecha 3 (8.19), tal como se detalla en el cuadro 2. Respecto a los tratamientos, las lecturas significativamente superiores se obtuvieron en TRAT 5 (8.48) y TRAT 3 (8.46), en contraste con TRAT 2, que registró el valor más bajo (8.2343). Dichos hallazgos son consistentes con los de Fontalvo et al. (2022), quienes documentaron variaciones similares de pH durante la evaluación de sistemas acuícolas sometidos a tratamientos biológicos y fisicoquímicos. En cuanto a la concentración de nitratos (NITRA), se identificaron diferencias altamente significativas. Las máximas concentraciones se registraron en la fecha 4 (105.00 ppm) y en el TRAT 4 (52.1429 ppm), mientras que los valores mínimos se observaron en las fechas 3, 5 y 7, con niveles inferiores a 10 mg/L, así como en el tratamiento testigo (9.6429 ppm). Estos resultados concuerdan con las investigaciones de Sharma (2014) y Singh (2022), quienes señalaron que las concentraciones de nitrato pueden variar notablemente en función de la temporalidad del muestreo y la naturaleza del tratamiento aplicado. Respecto a los nitritos (NITRI), la fecha 4 presentó la mayor concentración (0.6975 mg/L), mientras que la fecha 3 exhibió la menor (0.0639 mg/L). A nivel de tratamientos, el valor promedio más alto se obtuvo en TRAT 2 (0.3909 mg/L) y el más bajo en TRAT 5 (0.2153 mg/L). El análisis estadístico reveló diferencias significativas entre los tratamientos, lo cual denota una variabilidad en la concentración de nitritos influenciada por las condiciones experimentales. Estos resultados guardan correspondencia con lo reportado por Hassan et al. (2024) y Cissé et al. (2024), quienes también informaron diferencias significativas en los niveles de nitritos asociadas a la temporalidad del muestreo

Cuadro 3. Prueba de comparación de medias por tratamiento.

Fuentes de variación	pH		Cond		Sedi		Nitra		Nitri	
Tratamientos										
Trat 2	8.2343	a	747.29	ab	32.3095	b	33.0952	c	0.39098436	a
Trat 1	8.3390	ab	777.57	b	7.5000	bc	13.5714	d	0.25171344	ab
Trat 4	8.4538	b	749.57	ab	5.1548	c	52.1429	a	0.30142464	ab
Trat 3	8.4652	b	736.95	a	8.7024	bc	50.7143	b	0.26000625	ab
Trat 5	8.4833	b	754.62	ab	32.3095	a	9.6429	e	0.21528576	b

Los valores en la misma columna con la misma letra son estadísticamente iguales, Conductividad (COND), Sedimentos (SEDI), Nitratos (NITRA), Nitritos (NITRI).

CONCLUSIONES

Con base en los resultados obtenidos, se concluye que el filtro mixto en gradiente (TRAT 4) compuesto por grava gruesa, tezontle y grava fina fue el tratamiento más eficiente para mejorar la calidad del agua en el sistema de recirculación acuícola evaluado. Este diseño demostró el mejor balance entre remoción mecánica de sólidos suspendidos (84 % de reducción frente al testigo) y actividad biológica nitrificante (52.14 ppm de nitratos producidos). Se recomienda la adopción de configuraciones en gradiente con materiales regionales, como el tezontle, para el diseño de filtros en sistemas RAS de pequeña y mediana escala, y se sugiere para futuras investigaciones evaluar la interacción de estos filtros con la carga de cultivo y la tasa de recambio de agua.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Cissé, M., Konaté, Y., & Savadogo, B. (2024). Performance evaluation of biofiltration systems using local substrates in recirculating aquaculture. *Aquacultural Engineering*, *104*, 102389.

Díaz, E., & Mendoza, R. (2024). Evaluación de biofiltros con sustratos regionales para sistemas acuícolas de recirculación en México. *Revista Mexicana de Ingeniería Acuícola*, *8*(2), 45-58.

Hassan, M. A., Rahman, M. S., & Alam, M. J. (2024). Multifactorial evaluation of combined mechanical and biological filtration on water quality parameters in tilapia RAS. *Aquaculture Research*, *55*(3), 892-906.

Instituto Mexicano de Investigación en Pesca y Acuacultura Sustentable (IMIPAS). (2025). *Diagnóstico de la Acuacultura rural en México (2022-2024)*. Gobierno de México.

Martínez García, J., García Muñoz, P., & Rodríguez Chueca, J. J. (2024). Acuicultura y sistemas RAS: un estudio bibliográfico de técnicas y tratamientos.

Peña Ruiz, L. A., & Sánchez De La Peña, W. A. (2021). *Estudio de factibilidad para implementar sistemas de recirculación acuícola (RAS) aplicado a la tilapia roja en los departamentos del Tolima y Huila, disminuyendo los impactos ambientales en fuentes hídricas producidos por la piscicultura convencional* [Tesis de doctorado, Corporación Universitaria Minuto de Dios].

Rivera Cortez, B., Reyes Fuentes, M., Loyola Gutiérrez, M. C., & Yáñez López, R. (2025). Tecnología intermedia para la producción de tilapia. Tecnológico Nacional de México-Roque.

Rivera, A. G. (2025). Diseño de un sistema de recirculación y filtración de agua de criadero. *Revista Tecnológica CEA*, *10*(31), 487–496.

Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales (SEMARNAT). (2022). *Norma Oficial Mexicana NOM-001-SEMARNAT-2021*. Diario Oficial de la Federación (DOF).

Sharma, P., Kumar, S., & Patel, V. (2023). Volcanic rock as biofilter media in recirculating aquaculture systems: a comparative review. *Reviews in Aquaculture*, *15*(2), 651-670.

Singh, R. K., Varma, A., & Tiwari, S. (2022). Multi-layer filtration systems for aquaculture wastewater treatment: efficiency and design considerations. *Journal of Water Process Engineering*, *47*, 102789.