AGUA Y CONOCIMIENTO

Año 2026 | Vol.7 | 29 - 41
ISSN 2411 0027
revistas.unan.edu.ni/index.php/RevAgua

Evaluación multitemporal de calidad del agua en sistema piscícola semi-intensivo de tilapia (*Oreochromis niloticus*) y su gestión ambiental

Multitemporal assessment of water quality in a semi-intensive tilapia (Oreochromis niloticus) fish farming system and its environmental management

Daniela Auxiliadora Acevedo Moreira, Misael Alejandro Bendaña Ruíz

1. Universidad Nacional Casimiro Sotelo Montenegro (UNCSM). Managua, Nicaragua.

RESUMEN

El presente estudio evaluó de manera multitemporal la calidad del agua en un sistema piscícola semi-intensivo de *Oreochromis niloticus* ubicado en el zoocriadero de la Universidad Nacional Casimiro Sotelo Montenegro, Managua, Nicaragua, durante el período comprendido entre octubre de 2025 y abril de 2026. El objetivo consistió en caracterizar las condiciones fisicoquímicas y orgánicas del sistema para valorar su viabilidad ambiental y productiva. Se analizaron parámetros como pH, temperatura, conductividad eléctrica, turbidez, oxígeno disuelto, alcalinidad, dureza total, sólidos suspendidos totales, sólidos sedimentables y demanda bioquímica de oxígeno (DBO_5). Además, se realizó una prueba de jarras con cloruro férrico ($FeCl_3$) como ensayo complementario de tratamiento de efluentes.

Los resultados mostraron condiciones biológicamente favorables para el cultivo de tilapia, con concentraciones adecuadas de oxígeno disuelto (6.45 mg/L) y valores de DBO_5 (32 mg/L) inferiores al límite máximo permisible establecido en la normativa ambiental nicaragüense. Sin embargo, se identificó una marcada hipermineralización del sistema, evidenciada por elevada dureza total y predominancia de dureza magnésica. La prueba de jarras demostró que dosis bajas de $FeCl_3$ (2 mg/L) redujeron la turbidez a 1.03 NTU, mientras que dosis elevadas (20 mg/L) ocasionaron acidificación extrema (2.11pH) y aumento de sólidos suspendidos (779 mg/L). Se concluyó que el sistema presentó viabilidad productiva, aunque requiere monitoreo continuo y manejo hidroquímico preventivo para garantizar su sostenibilidad ambiental.

Palabras clave: *Oreochromis niloticus*, calidad del agua, acuicultura semi-intensiva, parámetros fisicoquímicos, monitoreo ambiental.

Recibido: 28/02/2026 | Aceptado: 28/04/2026| Publicado: 28/05/2026

© 2026 por UNAN-Managua/CIRA licencia bajo CC BY-NC 4.0

ABSTRACT

This study conducted a multi-temporal assessment of water quality in a semi-intensive *Oreochromis niloticus* fish farming system located at the fish hatchery of the Casimiro Sotelo Montenegro National University in Managua, Nicaragua, during the period from October 2025 to April 2026. The objective was to characterize the physicochemical and organic conditions of the system to assess its environmental and productive viability. Parameters such as pH, temperature, electrical conductivity, turbidity, dissolved oxygen, alkalinity, total hardness, total suspended solids, settleable solids, and biochemical oxygen demand (BOD_5) were analyzed. Additionally, a jar test with ferric chloride ($FeCl_3$) was conducted as a complementary effluent treatment trial.

The results showed biologically favorable conditions for tilapia farming, with adequate concentrations of dissolved oxygen (6.45 mg/L) and BOD_5 values (32 mg/L) below the maximum permissible limit established in Nicaraguan environmental regulations. However, marked hypermineralization of the system was identified, evidenced by high total hardness and a predominance of magnesium hardness. The jar test demonstrated that low doses of $FeCl_3$ (2 mg/L) reduced turbidity to 1.03 NTU, while high doses (20 mg/L) caused extreme acidification (pH 2.11) and an increase in suspended solids (779 mg/L). It was concluded that the system is viable from a production standpoint, although it requires continuous monitoring and preventive hydrochemical management to ensure its environmental sustainability.

Keywords: *Oreochromis niloticus*, water quality, semi-intensive aquaculture, physicochemical parameters, environmental monitoring.

INTRODUCCIÓN

Garantizar el suministro continuo de alimento para satisfacer las necesidades de todas las personas ha sido un desafío que la humanidad ha enfrentado desde sus orígenes, de acuerdo con APROMAR (2025), los egipcios aprovechaban las crecidas del río para renovar agua y portar alimentos de forma natural, en la China imperial se cultivaban carpas en estanques de tierra, integrando su crianza con la agricultura de arroz: esta combinación resultaba especialmente eficiente: el agua de los arrozales servía de hábitat para los peces, mientras que sus desechos fertilizaban los cultivo.

Con el tiempo la acuicultura ha evolucionado como una disciplina moderna y optimizada, gracias a su versatilidad, innovación tecnológica, importancia alimentaria y comercial, ha experimentado un crecimiento sostenido en Latinoamérica, especialmente la piscicultura en países como Brasil, Colombia, México, Costa Rica y Cuba destaca la producción de tilapia bajo sistemas semi-intensivos e intensivos orientados al abastecimiento interno y exportación (Hernández-Rodríguez et al.2025).

En Nicaragua, por su parte, las técnicas de piscicultura han experimentado un crecimiento en el sector pesquero y acuícola desde 2006 hasta 2023 exponiendo progresos en la producción, exportación y valor en el sector según informe del Instituto Nicaragüense de Pesca y Acuicultura (INPESCA), (Morales, 2024); ya en 2025 representa una herramienta clave para la seguridad alimentaria y la economía familiar, especialmente en zonas rurales.

Con el aumento demográfico, también aumenta la necesidad de garantizar alimento

a las poblaciones. En las últimas décadas los piscicultores han volcado su interés en el cultivo de tilapia (*Oreochromis niloticus*), reconocida por su resistencia, rápida adaptación a variaciones ambientales y facilidad de manejo en sistemas semi-intensivos y extensivos. Sin embargo, persisten desafíos importantes como la intensificación de los sistemas de producción, acumulación de materia orgánica en los estanques y la susceptibilidad de los ejemplares a enfermedades bacterianas, deterioro potencial de la calidad del agua y la ausencia de protocolos de monitoreo multitemporal local estandarizados que permitan predecir riesgos sanitarios.

Estos retos justifican la relevancia de diseñar e implementar estrategias de gestión ambiental y monitoreo de calidad de agua en los sistemas acuícolas, que favorezcan una producción sostenible y prevengan riesgos de eutrofización y afectaciones sanitarias. Considerando que, en Nicaragua, existen limitadas investigaciones enfocadas en la caracterización integral y temporal de la calidad del agua en sistemas piscícolas universitarios semi-intensivos, este estudio aporta información de base sobre el comportamiento fisicoquímico y orgánico de proyectos similares, constituyendo una referencia técnica para futuras investigaciones y toma de decisiones en el campo acuícola.

Por ello, el presente estudio tuvo como objetivo evaluar de manera general la calidad del agua de un sistema piscícola universitario de *Oreochromis niloticus* considerando parámetros fisicoquímicos y de carga orgánica durante jornadas de monitoreo realizadas entre octubre 2025 y abril 2026. Los indicadores valorados incluyeron: temperatura (T°), conductividad eléctrica (CE), pH, turbidez, oxígeno disuelto (OD), demanda biológica de oxígeno (DBO), sólidos suspendidos (SS), sólidos sedimentables, dureza total (DT), alcalinidad y dureza cálcica, además de una prueba de jarras como procedimiento complementario para caracterizar las condiciones ambientales del estanque.

MATERIALES Y MÉTODOS

Descripción del área de estudio.

El agua bajo análisis proviene del estanque de tilapias del zoocriadero ubicado en el vivero de la Universidad Nacional Casimiro Sotelo Montenegro en Managua, Nicaragua. Responde a las coordenadas 12°07’34.7’’N, 86°16’08.5’’O (Figura 1).

La infraestructura del estanque consta de 2 pilas de concreto de 360 m^2 cada una, 1.5 m de profundidad, capacidad volumétrica de 1080 m^3 de agua, densidad poblacional de 3000 alevines al momento del estudio, la alimentación consistió en concentrado proteico suministrado dos veces al día, con una ración aproximada de 20g por evento de alimentación para la biomasa presente en el estanque, recambio de agua indefinido; sistema de drenaje es artesanal, se utilizan baldes que transportan el agua del estanque y es reaprovechada en el sistema de riego del vivero perteneciente al mismo recinto.

Figura 1. Mapa de Localización del Área de Estudio.

Diseño del estudio.

Para dar cumplimiento al propósito del estudio se plantea un monitoreo multitemporal descriptivo, a través de 5 jornadas de monitoreo que inician en octubre 2025 y se extiende hasta abril 2026, correspondientes a actividades académicas de laboratorio de la carrera de ingeniería ambiental. Su enfoque descriptivo-observacional está orientado a la recolección y análisis in situ y en laboratorio, incluyendo una prueba experimental complementaria de coagulación-floculación sin intervención directa en el sistema acuícola.

Se consideraron variables **fisicoquímicas** como pH, T°, OD, CE, DT, dureza cálcica, alcalinidad, además de parámetros **orgánicos** como DBO_5, sólidos suspendidos y sedimentables. Asimismo, se incluyó la aplicación de la **prueba de jarras** como procedimiento metodológico complementario para evaluar dosaje en procesos de tratamiento. Debido a la naturaleza académica de las jornadas de monitoreo, los análisis se limitaron a dos mediciones por parámetro sin réplicas analíticas ni seguimiento temporal continuo; por tanto, los resultados no establecen correlaciones entre variables.

A pesar de estas limitaciones, el estudio constituye una aproximación descriptiva al comportamiento fisicoquímico y orgánico del agua del sistema acuícola, aportando información de referencia útil para investigaciones y monitoreos similares.

Las jornadas de monitoreo realizadas entre octubre de 2025 y abril de 2026 se muestran en la Figura 2.

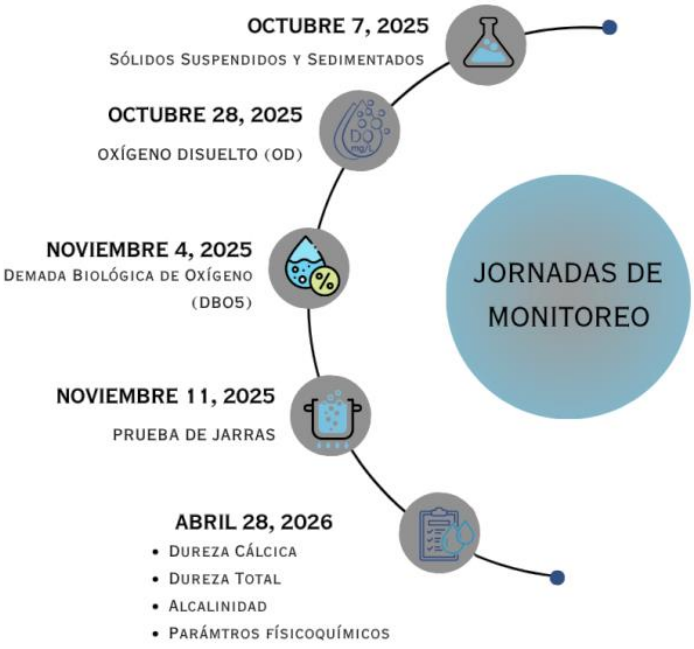

Figura 2. Cronología de Jornadas de monitoreo y Parámetros Evaluados.

Métodos analíticos

Los sólidos sedimentables se midieron utilizando el método de cono Imhoff, mientras que los sólidos suspendidos totales se cuantificaron mediante filtración y secado gravimétrico. Para la determinación de la concentración de OD se utilizó el método Winkler. La DBO_5 se determinó por incubación a 20 °C durante cinco días, siguiendo procedimientos estandarizados. Todos los análisis se efectuaron conforme a metodologías descritas en Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater, 23rd edition (2017).

La prueba de jarras tuvo la finalidad de evaluar la eficiencia de cloruro férrico ($FeCl_3$) como coagulante para el tratamiento de efluentes del sistema piscícola sin intervención directa en el estanque. A escala laboratorio se aplicaron dosis de 1, 2, 4, 8 y 20 mg/L de coagulante, evaluando los cambios en el pH, conductividad eléctrica, turbidez y sólidos suspendidos totales después de la coagulación.

El procedimiento incluyó etapas de mezcla rápida, floculación lenta y sedimentación. La eficiencia del procedimiento se analizó comparando los valores iniciales y finales de los parámetros evaluados, identificando así la dosis de coagulante más adecuada para el tratamiento.

Se realizaron mediciones de parámetros fisicoquímicos como conductividad eléctrica, turbidez, pH y temperatura, utilizando equipos previamente calibrados. Los valores se registraron in situ siguiendo el protocolo establecido para la selección de zonas de muestreo.

Asimismo, se determinó la alcalinidad total y sus fracciones (fenolftaleína, hidróxidos, carbonatos y bicarbonatos) mediante el método titulométrico, empleando volúmenes estandarizados de muestra y soluciones indicadoras. De igual manera, se evaluó la dureza total, el calcio y la dureza cálcica por

el método titulométrico con EDTA, ajustando el pH de las muestras y utilizando indicadores específicos para cada análisis. Las titulaciones se realizaron hasta alcanzar el punto de equivalencia.

RESULTADOS

Los resultados obtenidos durante las jornadas de monitoreo permitieron caracterizar las condiciones fisicoquímicas y orgánicas del sistema piscícola evaluado mediante el análisis de parámetros de calidad de agua y un ensayo complementario de tratamiento de agua residual.

La caracterización fisicoquímica del agua incluyó la determinación de parámetros asociados a mineralización, acidez y estabilidad química del sistema (Ver tabla 1).

Tabla 1. Parámetros Fisicoquímicos.

Parámetro	Valor	Unidad
pH	7.32	pH
Turbidez	17.80	NTU
T°	27.1	°C
CE	517	µS/cm
Potencial	311.5	mV
Alcalinidad	216	mg/L
DT	1160	
Dureza cálcica	80	
Ion Ca	32.06	
Dureza Magnésica	1080	

Respecto a los parámetros orgánicos, los sólidos suspendidos totales presentaron una concentración de 25mg/L y la DBO_5 alcanzó 32 mg/L, concentraciones superiores a los sólidos sedimentables no detectados y a los 6.4mg/L de OD (ver tabla 2).

Tabla 2. Parámetros Orgánicos.

Parámetro	Unidad (mg/L)
Sólidos Sedimentable	No detectado
Sólidos Suspendidos Totales	25
DBO_5	32
OD	6.45

La prueba de jarras mostró variaciones en la turbidez en función de la dosis de $FeCl_3$ aplicada. La menor turbidez se registró con la dosis de 2mg/L, mientras que el valor máximo correspondió a 6.69 NTU. Asimismo, se observaron cambios en el pH, conductividad eléctrica y SST en dependencia al dosaje (Tabla 3, Figura 3).

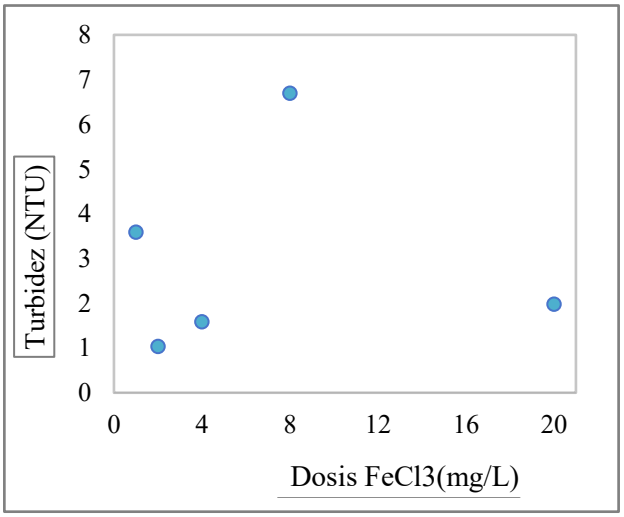

Figura 3. Variación de Turbidez en Función de la Dosis de FeCl3.

Tabla 3. Prueba de Jarras.

Dósis de Coagulante $FeCl_3$ (mg/L)	Conductividad (µS/cm)	pH	Turbidez (NTU)	Sólidos Suspendidos Totales (mg/L)
1	421	6.99	3.59	180
2	398	6.75	1.03	186
4	390	6.17	1.58	201
8	480	6.22	6.69	237
20	1902	2.11	1.98	779

DISCUSIÓN

La evaluación multitemporal del estanque acuícola evidencia un sistema con una calidad de agua biológicamente viable para el cultivo, pero que presenta retos hidroquímicos significativos que demandan un manejo riguroso y preventivo. Los hallazgos se discuten en torno a tres ejes fundamentales:

Dinámica del Oxígeno y Carga Orgánica (Estabilidad Biológica)

El oxígeno disuelto (OD) se mantuvo en rangos óptimos, un factor crítico para el desarrollo de la especie, ya que previene el estrés fisiológico, reduce la mortalidad y minimiza la susceptibilidad a enfermedades patógenas asociadas a la hipoxia. En paralelo, la Demanda Bioquímica de Oxígeno (DBO_5) alcanzó un pico de 32.00 mg/L en las diluciones evaluadas. Esta cifra refleja un aporte constante de materia orgánica biodegradable (restos de alimento y excretas), pero se mantiene en niveles seguros, muy por debajo del límite de 400 mg/L fijado por el Decreto 33-95 para vertidos agropecuarios. Ecológicamente, la carga orgánica del sistema se encuentra equilibrada, lo que evita episodios inmediatos de eutrofización o proliferación anaerobia. Estos resultados concuerdan con la literatura reciente en acuicultura sostenible, la cual señala que mantener niveles de DBO por debajo de 50 mg/L en sistemas cerrados o semi-intensivos es vital para prevenir caídas letales de oxígeno durante los picos de respiración nocturna (Boyd, C. E., 2019).

Perfil Hidroquímico y Riesgo de Estrés Osmótico

El agua analizada posee una alcalinidad de 216 mg/L, confiriéndole una excelente capacidad tampón para neutralizar ácidos y resistir fluctuaciones bruscas de pH derivadas de la actividad biológica. No obstante, el hallazgo más crítico es la extrema hipermineralización del sistema, caracterizada por una dureza total de 1160 mg/L. De manera atípica, esta dureza está dominada por iones de magnesio (1080 mg/L) frente a una reducida dureza cálcica (80 mg/L), lo que sugiere una fuerte meteorización de formaciones geológicas ricas en silicatos ferromagnesianos o dolomita. También se sospecha que la estructura de concreto podría estar fracturada y liberando estas altas cargas en forma de carbonato cálcico. Si bien las tilapias destacan por su eurihalinidad y adaptabilidad, investigaciones hidrobiológicas actuales, como el trabajo de El-Sayed, A.-F. M. (2019)

en su libro titulado *Tilapia culture:2nd ed. (p.47-67),* confirman que durezas que superan los 400 mg/L inducen estrés osmótico crónico, obligando al pez a desviar energía metabólica del crecimiento hacia la osmorregulación branquial. Además, esta hipermineralización representa un severo riesgo técnico por incrustación calcárea en la infraestructura asociada.

Partículas Suspendidas y Tratabilidad de Efluentes

La opacidad del cuerpo de agua (17.80 NTU) no obedece a la acumulación de sedimentos pesados, puesto que la concentración de sólidos sedimentables fue nula y los Sólidos Suspendidos Totales (SST) promediaron bajos niveles (10 a 25 mg/L), cumpliendo a cabalidad con el Decreto 21-2017. Esto demuestra que la turbidez es generada mayoritariamente por coloides finos, microalgas y flóculos orgánicos en suspensión.

Para su remoción, la prueba de jarras ratificó la alta eficacia del Cloruro Férrico (FeCl3) bajo una dosificación conservadora: la aplicación de 2 mg/L logró reducir la turbidez a 1.03 NTU sin desestabilizar el pH del agua. En contraste, se comprobó que el margen operativo es sumamente estrecho; una sobredosificación de 20 mg/L causa un colapso del sistema, provocando una acidificación letal (pH de 2.11), disparando la conductividad (1902 µS/cm) y aumentando los sólidos suspendidos a 779 mg/L debido a la sobreproducción de lodos químicos. Esto valida los manuales contemporáneos de tratamiento de aguas, por ejemplo, Wastewater engineering: Treatment and resource recovery (5a ed.), los cuales advierten que los coagulantes férricos son altamente reactivos con la alcalinidad del medio, exigiendo controles de dosimetría milimétricos para evitar toxicidad colateral en efluentes destinados a cuerpos receptores vivos.

RECOMENDACIONES

Derivado de la caracterización ambiental del sistema acuícola, se proponen las siguientes directrices orientadas al manejo del estanque y al tratamiento de los efluentes generados.

Manejo de la Carga Orgánica y Alimentación

Dado que la DBO_5 alcanzó los 32.00 mg/L, se recomienda implementar una dosificación controlada del concentrado proteico en función de la etapa de crecimiento y del peso promedio de los peces, es decir, ajustar la tasa de alimentación (%peso corporal/día) con base en la biomasa total del estanque. Asimismo, se sugiere realizar purgas periódicas del fondo del estanque para prevenir la acumulación de sedimentos orgánicos y evitar que la DBO_5 alcance niveles que comprometan la concentración de oxígeno disuelto durante la noche.

Monitoreo del Estrés Osmótico

Ante los elevados valores de dureza total (1160 mg/L) y dureza magnésica registrados, se recomienda evaluar periódicamente indicadores de estrés fisiológico o disminución en las tasas de crecimiento de la población de *Oreochromis niloticus*. De ser factible, se debe considerar la mezcla controlada con aguas de menor mineralización durante los recambios o, alternativamente, orientar la producción en líneas genéticas de tilapia con alta tolerancia a la salinidad y dureza.

A su vez, conviene incorporar análisis complementarios como Demanda química de oxígeno (DQO), fósforo total, nitrógeno total, carbono orgánico total (COT), metales pesados, cloruros y sulfatos a propósito de obtener un perfil hidroquímico más completo y específico que permita tomar decisiones fundamentadas en evidencias y maximizar las oportunidades de éxito productivo y ambiental.

Protocolo Estricto de Tratamiento Químico

Para el tratamiento de las aguas residuales generadas, el uso de Cloruro Férrico ($FeCl_3$) debe restringirse a un margen operativo estrecho de 2 a 4 mg/L. Debe evitarse estrictamente la aplicación empírica o sobredosificación del coagulante, ya que concentraciones como las de 20 mg/L inducen una disminución abrupta del pH (2.11) y un incremento de sólidos potencialmente perjudiciales para cualquier cuerpo receptor.

Debido a que este experimento tuvo carácter complementario, se recomienda replicarlo utilizando otros tipos de coagulante con el fin de comparar su desempeño y evaluar su efectividad bajo las condiciones específicas del sistema estudiado.

Protección de Infraestructura

El agua cruda no debe utilizarse sin evaluación previa ni procesos de ablandamiento (cuando aplique) en sistemas presurizados, calderas o tuberías de diámetros reducido, debido al alto riesgo de incrustación asociado a su perfil hipermineralizado.

Igualmente, es aconsejable realizar una inspección detallada de la infraestructura para corroborar la hipótesis de posibles fisuras y evaluar la necesidad de implementar medidas correctivas, tales como revestimiento de concreto, uso de geomembranas, o aplicación de arcilla bentonita sódica. Esta última posee alta capacidad de hinchamiento (hasta 20 veces su volumen en presencia de agua) debido a su riqueza en montmorillonita, por lo que es utilizada en prácticas de manejo de estanques como sellador natural (FAO, 2015).

Finalmente, se recomienda establecer un plan de monitoreo continuo y cronológico que permita evaluar de manera sistemática la calidad del agua y el desempeño productivo del sistema. Resulta esencial fomentar el apoyo de la comunidad educativa y científica, así como la coordinación interinstitucional para realizar estudios más profundos, complementados con programas de capacitación en temática acuícola que fortalezcan las capacidades técnicas locales.

Asimismo, el dominio y aplicación de las normativas pertinentes constituye un eje fundamental para garantizar la sostenibilidad del sistema y el cumplimiento del marco legal vigente.

A continuación, se presenta en la Tabla 4, una comparación entre los parámetros evaluados en el estudio y los Límites Máximos Permisibles (LMP) establecidos en la normativa ambiental nicaragüense, tomando como referencia principal el **Decreto Ejecutivo N°21-2017**, Reglamento en el que se establecen las Disposiciones para el Vertido de Aguas Residuales, así como la Ley N°620, Ley General de las Aguas Nacionales.

Tabla 4. Comparativa con la Legislación Ambiental de Nicaragua

Parámetro	Valor del Estudio	Unidad	LMP (Decreto 21-2017)*	Estado de Cumplimiento
pH	7.32	Unidades de pH	6.0 - 9.0	**Cumple**
Temperatura	27.1	°C	< 40.0	**Cumple**
Demanda Biológica de Oxígeno (DBO_5)	32	mg/L	Máx. 110	**Cumple**
Sólidos Suspendidos Totales (SST)	25	mg/L	Máx. 50 (General) / 100 (Sistemas de tratamiento)	**Cumple**
Sólidos Sedimentables	No detectado	mg/L (Equivalente a mL/L)	Máx. 1.0	**Cumple**
Oxígeno Disuelto (OD)	6.45	mg/L	> 4.0 (Criterio para protección de vida acuática)	**Cumple**
Conductividad Eléctrica (CE)	517	µS/cm	No regulado para vertidos generales	N/A
Turbidez	17.80	NTU	No regulado directamente en descargas	N/A
Alcalinidad	216	mg/L	No regulado	N/A
Dureza Total	1160	mg/L	No regulado	N/A

Nota técnica: Parámetros como la alcalinidad, dureza total, turbidez y conductividad eléctrica son de alto interés para la salud y productividad del cultivo (y están regulados en normativas de agua potable como la NTON 05 007-98), pero **no** tienen un límite de restricción directa para ser descargados al medio ambiente o alcantarillado bajo el esquema general del Decreto 21-2017.

CONCLUSIONES

La evaluación multitemporal del sistema piscícola semi-intensivo de Oreochromis niloticus permitió determinar que las condiciones generales del agua resultan biológicamente adecuadas para el desarrollo de la especie, evidenciadas por concentraciones de oxígeno disuelto compatibles con la protección de la vida acuática y valores de DBO_5 que permanecieron dentro de los límites establecidos por la normativa ambiental nicaragüense. Estos resultados indican que, pese al aporte constante de materia orgánica derivado de restos de alimento y excretas, el sistema mantiene una estabilidad funcional que reduce el riesgo inmediato de procesos de eutrofización o eventos de hipoxia severa.

Desde el punto de vista hidroquímico, el principal hallazgo corresponde a la elevada dureza total registrada, dominada ampliamente por la fracción magnésica, lo que evidencia un sistema altamente mineralizado. Esta condición representa un factor potencial de estrés osmótico crónico para la tilapia, ya que incrementa la demanda energética asociada a los procesos de osmorregulación. Asimismo, el perfil químico observado sugiere posibles procesos de meteorización mineral o deterioro estructural del estanque, capaces de influir sobre la composición iónica del agua y favorecer fenómenos de incrustación en la infraestructura hidráulica.

La caracterización de sólidos suspendidos y turbidez demostró que la opacidad del agua no está asociada a sólidos sedimentables, sino principalmente a partículas coloidales y materia orgánica fina en suspensión. Bajo este contexto, la prueba de jarras confirmó la efectividad del cloruro férrico ($FeCl_3$) como coagulante para la reducción de turbidez a bajas dosis; sin embargo, también evidenció que la sobredosificación provoca alteraciones críticas en el equilibrio químico del agua, particularmente disminuciones extremas de pH y aumentos significativos de sólidos suspendidos, lo que limita su aplicación sin controles rigurosos de dosificación.

En términos normativos, la mayoría de los parámetros evaluados cumplieron con los Límites Máximos Permisibles establecidos en el Decreto Ejecutivo N.º 21-2017 y la Ley N.º 620, lo cual respalda la viabilidad ambiental del sistema bajo las condiciones actuales de operación. No obstante, la ausencia de regulación específica para variables como dureza total, alcalinidad y conductividad eléctrica evidencia la necesidad de complementar la evaluación legal con criterios técnicos orientados a la salud de los organismos cultivados y a la sostenibilidad operativa del sistema acuícola.

Finalmente, el estudio constituye una línea base técnico-ambiental para futuras investigaciones y monitoreos en sistemas piscícolas universitarios de Nicaragua, aportando información relevante sobre el comportamiento fisicoquímico y orgánico del agua en condiciones semi-intensivas. A pesar de las limitaciones metodológicas derivadas del número reducido de mediciones y la ausencia de réplicas analíticas, los resultados obtenidos permiten establecer criterios preliminares de gestión ambiental y fortalecen la importancia del monitoreo continuo como herramienta para la prevención de riesgos productivos y ambientales.

REFERENCIAS

Adisa, Y. (2025). *Water quality monitoring for tilapia: Essential equipment and daily testing routines*. Fish Farming Business. https://tilapia.fishfarmingbusiness.com/water-management/water-quality-monitoring-for-tilapia-essential-equipment-and-daily-testing-routines

Aigberua, A. O., Tarawou, J. T., & Abasi, C. Y. (2018). Effect of oxidation–reduction fluctuations on metal mobility of speciated metals and arsenic in bottom sediments of Middleton River, Bayelsa State, Nigeria. *Journal of Applied Sciences & Environmental Management, 22*(9), 1511. https://doi.org/10.4314/jasem.v22i9.25

APHA, AWWA, & WEF. (2017). *Standard methods for the examination of water and wastewater* (23rd ed.). American Public Health Association.

APROMAR. (2025). *La acuicultura, una historia de innovación a lo largo de los milenios*. National Geographic España. https://www.nationalgeographic.com.es/promociones/acuicultura-historia-innovacion-largo-milenios_26001

Asamblea Nacional de Nicaragua. (2007). *Ley Nº 620, Ley General de Aguas Nacionales*. La Gaceta, Diario Oficial, Nº 169.

Benyagoub, E., Radi, A., Benachour, A., & Boutayeb, M. (2025). Antibiotic resistance of pathogenic and bacterial contaminants isolated from fish pond wastewater in Bechar Province, Southwestern Algeria. *Agricultural Science Digest - A Research Journal*. https://doi.org/10.18805/ag.df-727

Boyd, C. E. (2019). *Water quality: An introduction* (3rd ed.). Springer Nature.

Boyd, C. E., & Tucker, C. S. (2014). *Pond aquaculture water quality management*. Springer Science & Business Media.

Chaux, G., Caicedo, J. R., & Fernandez, J. E. (2013). Tratamiento de efluentes piscícolas (tilapia roja) en lagunas con *Azolla pinnata*. *Biotecnología en el Sector Agropecuario y Agroindustrial*. http://www.scielo.org.co/pdf/bsaa/v11n2/v11n2a06.pdf

Disposiciones para el control de la contaminación provenientes de las descargas de aguas residuales domésticas, industriales y agropecuarias. (1995). Gob.ni. http://legislacion.asamblea.gob.ni/Normaweb.nsf/9e314815a08d4a6206257265005d21f9/138a846c29f5f0760625717900509fa4

El-Sayed, A.-F. M. (2019). *Tilapia culture* (2nd ed.). Academic Press.

FAO. (2015). *Small-scale aquaculture: Practices and environmental sustainability*. FAO Fisheries Technical Paper.

Hernández-Rodríguez, A., Alceste-Oliviero, C., Sanchez, R., Jory, D., Vidal, L., & Constantine-Franco, L.-F. (2025). Aquaculture development trends in Latin America and the Caribbean. FAO. https://www.fao.org/4/ab412e/ab412e20.htm

Lacayo, C. (1984). Informe sobre el desarrollo de la acuicultura en Nicaragua. En *Informes nacionales sobre el desarrollo de la acuicultura en América Latina*. Organización de las

Naciones Unidas para la Agricultura y la Alimentación.

Lin, W.-C., Brondum, K., Monroe, C. W., & Burns, M. A. (2017). Multifunctional water sensors for pH, ORP, and conductivity using only microfabricated platinum electrodes. *Sensors, 17*(7), E1655. https://doi.org/10.3390/s17071655

Metcalf & Eddy Inc., Tchobanoglous, G., Burton, F. L., Tsuchihashi, R., & Stensel, H. D. (2013). *Wastewater engineering: Treatment and resource recovery* (5th ed.). McGraw-Hill Professional.

Morales, J. (2024, January 15). INPESCA: Avances en la pesca y acuicultura de Nicaragua (2006–2023). *La Nueva Radio Ya*. https://nuevaya.com.ni/nacionales/inpesca-avances-en-la-pesca-y-acuicultura-de-nicaragua-2006-2023/

Presidencia de la República de Nicaragua. (2017). *Decreto Ejecutivo Nº 21-2017, Reglamento que establece las disposiciones para el vertido de aguas residuales*. La Gaceta, Diario Oficial, Nº 229.

Rodríguez, D. M., & Gallego, D. d. J. (2019). Evaluación del quitosano como coagulante para el tratamiento de efluentes piscícolas. *Revista Colombiana de Biotecnología, 21*(1). https://dialnet.unirioja.es/servlet/articulo?codigo=7046421