Horizonte Académico
Revista Multidisciplinaria
Recibido:09/11/2025 Aprobado:10/12/2025

DOI: https://doi.org/10.70208/3007.8245.v5.n3.306

Caracterización fisicoquímica del río Rosales en Grecia periodo 2023 – 2025, calidad del agua superficial: implicaciones ecológicas y sanitarias

John Diego Bolaños Alfaro
john.bolanos@ucr.ac.cr
https://orcid.org/0000-0002-1884-5373
Universidad de Costa Rica
Costa Rica

RESUMEN

La calidad del agua superficial del río Rosales fue evaluada mediante análisis fisicoquímicos en 18 muestras recolectadas durante los años 2023, 2024 y 2025, con el objetivo de establecer el grado de contaminación en diferentes sectores del río (zona alta, media y baja), para reconocer los riesgos ecológicos y sanitarios asociados a dicha calidad. Se monitorearon parámetros como nitrógeno amoniacal, nitratos, fosfatos, demanda biológica de oxígeno (DBO_5), demanda química de oxígeno (DQO), turbidez, pH, oxígeno disuelto, entre otros. Se utilizó el Índice Holandés fisicoquímico y el índice biológico BMWP-CR para clasificar la calidad del río en cada sector analizado. Los resultados indican que en época seca predomina la contaminación moderada (clases 3 y 4), con niveles elevados de nutrientes (nitratos > 50 mg/L) y materia orgánica (DBO_5 > 15 mg/L). En época lluviosa se observó una mejora relativa de la calidad del río, a contaminación incipiente (clase 2) por el aumento de caudal. Se determinaron altas concentraciones de nitratos y nitrógeno amoniacal durante los tres años, y se notaron en sitio múltiples fuentes de contaminación puntual, entre ellos vertidos residuales, así como contaminación difusa por escorrentía de contaminantes agrícolas que sumados al irrespeto de las zonas de protección del río provocan un excesivo aporte de nutrientes generando eutroficación incipiente con proliferación de algas y macrófitas en la zona baja del río. En conclusión, el río Rosales presenta una contaminación incipiente o superior que promueve procesos eutróficos que merecen medidas de gestión encausadas a mejorar la calidad del agua para asegurar la integridad ecológica y la salud humana en las comunidades circunvecinas.

***Palabras clave**:* calidad del agua, contaminación del agua, eutrofización, río rosales, macroinvertebrados

Physicochemical characterization of the Rosales River in Grecia – Costa Rica period 2023 – 2025, surface water quality: ecological and sanitary implications

ABSTRACT

The surface water quality of the Rosales River was evaluated through physicochemical analyses of 18 samples collected during 2023, 2024, and 2025, with the aim of assessing the degree of contamination in different sections of the river (upper, middle, and lower zones) and identifying the associated ecological and health risks. Parameters such as ammoniacal nitrogen, nitrates, phosphates, biochemical oxygen demand, chemical oxygen demand, turbidity, pH, dissolved oxygen, among others, were monitored. The Dutch physicochemical index and the biological index BMWP-CR were used to classify the river's quality in each analyzed sector. The results indicate that during the dry season, moderate contamination (classes 3 and 4) predominates, with elevated levels of nutrients (nitrates > 50 mg/L) and organic matter (BOD_5 > 15 mg/L). In the rainy season, a relative improvement in water quality was observed, shifting to incipient contamination (class 2) due to increased flow. High concentrations of nitrates and ammoniacal nitrogen were recorded throughout the three years. Multiple point sources of pollution (wastewater discharges and agricultural runoff) were noted on site, and along with the disregard for riparian protection zones, these contributed to an excessive input of nutrients, generating incipient eutrophication with the proliferation of algae and macrophytes in the lower section of the river. In conclusion, the Rosales River presents incipient or higher levels of contamination that foster eutrophic processes, which call for management measures aimed at improving water quality to ensure ecological integrity and human health in the surrounding communities.

Keywords: water quality, eutrophication, water pollution, rosales river, macroinvertebrates

INTRODUCCIÓN

Costa Rica es reconocida por su abundancia hídrica; sin embargo, el país destina alrededor del 2,6 % del agua extraída al uso doméstico (Valverde, 2013). A escala global, lagos, ríos y embalses concentran apenas el 0,4 % del agua dulce disponible (Dong et al., 2025). En las últimas décadas, la expansión urbana, la agricultura intensiva y las descargas de aguas residuales sin tratamiento han deteriorado la calidad del agua en múltiples cuencas, y el cantón de Grecia no es la excepción (Bolaños et al., 2025). Este deterioro ocurre cuando la capacidad de autodepuración del río es superada por las cargas contaminantes, limitando usos del agua y afectando la biodiversidad.

Los macroinvertebrados acuáticos son bioindicadores útiles por su sensibilidad a cambios ambientales y a distintos grados de contaminación; en ríos tropicales, la disminución de su diversidad suele asociarse con incrementos de contaminación orgánica y química (García et al., 2017; Mendoza et al., 2020). En Costa Rica, el Decreto N.° 33903-MINAE-S establece la evaluación del agua superficial mediante el Sistema Holandés (índice fisicoquímico) y el BMWP-CR (índice biológico); de forma complementaria, los indicadores microbiológicos (p. ej., *Escherichia coli* y coliformes totales) permiten aproximar el riesgo sanitario.

La subcuenca del río Rosales presenta un desarrollo urbano creciente y, en varios tramos, presiones asociadas al irrespeto de zonas de protección, pérdida de cobertura ribereña, aumento de escorrentía contaminada y acumulación de desechos sólidos, condiciones que incrementan la vulnerabilidad del río y pueden favorecer procesos eutróficos. El río Rosales se ubica en el cantón de Grecia (Alajuela) y atraviesa sectores con influencia agropecuaria en la parte alta y media, y áreas periurbanas e industriales en la zona baja; además, recibe aportes de tributarios como el río Poró, lo que puede aumentar el arrastre de contaminantes desde la microcuenca superior.

El impacto antrópico en el río se relaciona con la carencia de alcantarillado sanitario: a nivel nacional solo el 4,2 % de las aguas residuales domésticas recibe tratamiento antes de su descarga, mientras el resto se vierte sin tratamiento (Ruiz Fallas, 2012). En este marco, la literatura reconoce la descarga de aguas residuales urbanas y la escorrentía agrícola como factores determinantes de degradación de aguas continentales y de eutrofización por exceso de nitrógeno y fósforo (FAO, 1996; Liyanage &

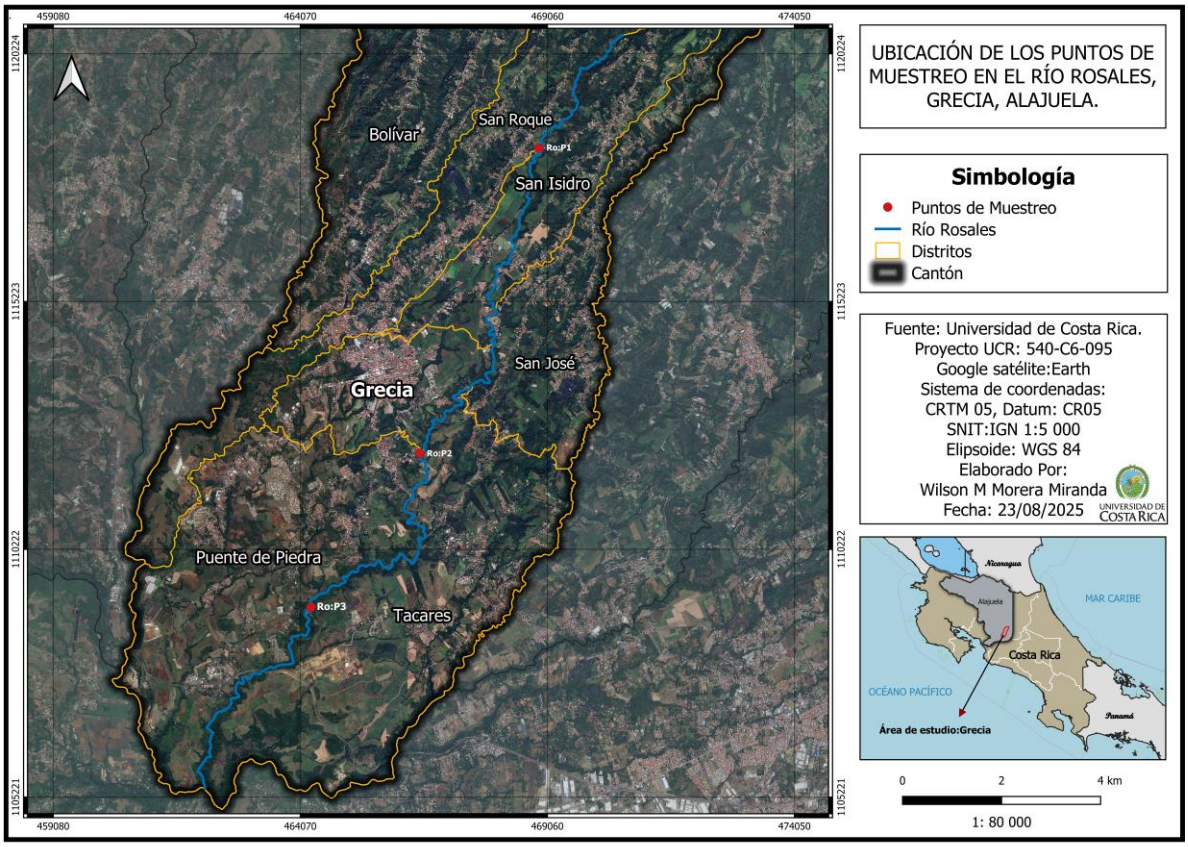
Yamada, 2017; Rodríguez, 2024). Por ello, la caracterización fisicoquímica y la identificación temprana del grado de contaminación son clave para orientar medidas de mitigación y prevenir un deterioro mayor.

Pese a la evidencia sobre presiones urbanas y agrícolas en cuencas del Valle Central, se dispone de información limitada, no integrada (fisicoquímica–microbiológica–biológica), con enfoque espacial (alta–media–baja) y multianual reciente, para describir la condición del río Rosales y discutir sus implicaciones ecológicas y sanitarias. En consecuencia, se plantea la hipótesis de que el río Rosales presenta contaminación incipiente dominada por aportes difusos y algunas fuentes puntuales que propician eutrofización temprana. Para evaluarla, el objetivo es caracterizar la calidad fisicoquímica del agua superficial del río Rosales durante 2023-2025, identificando nitrógeno amoniacal, porcentaje de oxígeno disuelto y DBO_5 para definir su calidad según el índice holandés, e incorporando otros parámetros fisicoquímicos e indicadores microbiológicos y biológicos para analizar sus implicaciones ecológicas y riesgos sanitarios. Asimismo, se comparan los hallazgos con otros estudios regionales para contextualizar el grado de contaminación y aportar insumos para el manejo integrado de la cuenca.

METODOLOGÍA

Área de estudio: El estudio se llevó a cabo en la cuenca del río Rosales, localizada en el cantón de Grecia, provincia de Alajuela, Costa Rica. El río recorre aproximadamente 39 km desde la zona alta del volcán Poás hacia el extremo noreste del cantón, desplazándose hacia el sureste hasta su desembocadura con el río Grande. Se definieron tres zonas de muestreo a lo largo del cauce, considerando como zona alta los primeros kilómetros, con una altitud de 990 m s.n.m., caracterizados por riberas dedicadas a la actividad agrícola extensiva; la zona media corresponde al tramo urbano-suburbano, ubicado a 850 m s.n.m., en una zona de alta densidad poblacional de los distritos San José y Grecia Centro y finalmente la zona baja, en el sector de Rincón de Salas, 800 m s.n.m., cerca de donde hoy se desarrollan varios parques industriales. (ver **Figura 1**).

Figura 1: Ubicación del río Rosales y las tres zonas de muestreo del estudio



Plan de muestreo y recolección: Las zonas de estudio fueron muestreadas dos veces al año, a saber, durante la estación seca (febrero–marzo) y durante la estación lluviosa (julio-agosto), por un período de tres años (2023-2025), desarrollando en total seis campañas de monitoreo en el río Rosales. En cada campaña se recolectó una muestra de agua por zona (alta, media y baja), para un total de 6 muestras al año (3 en estación seca y 3 en estación lluviosa) y 18 muestras de agua en todo el período (2023–2025). Además se recolectaron organismos bentónicos en los mismos sitios y campañas con el propósito de evaluar de manera conjunta la calidad del agua según los macroinvertebrados presentes, para un total de 18 muestras.

Análisis de variables de estudio: El monitoreo del río (durante tres años) abarcó la medición in situ con equipos multiparamétricos de la marca Hanna Instruments, la cuantificación de: oxígeno disuelto en porcentaje de saturación (PSO), temperatura, turbidez, pH, sólidos disueltos totales (SDT), conductividad y salinidad, siguiendo el procedimiento estándar utilizado en el Laboratorio de Química del Recinto de Grecia de la Universidad de Costa Rica. Posteriormente en dicho laboratorio con

equipos multiparámetro de marca Hanna Intruments también se cuantificó: la demanda química de oxígeno (DQO), fosfatos, nitratos, nitrógeno amoniacal, nitrógeno total, anhídrido fosfórico (P_2O_5) y demanda biológica de oxígeno (DBO_5) siguiendo los procedimientos del manual del fotómetro HI83399 Hanna Instruments, (s. f.). Se caracterizó además durante el año 2024 iones principales como: sodio, potasio, calcio, magnesio, cloruros, sulfatos y amonio empleando un cromatógrafo de iones (IC) marca Thermo Scientific, Dionex®, modelo ICS-5000 y en el caso de los iones metálicos de cobre y manganeso los mismos fueron determinados por espectrofotometría de absorción atómica (AA) con un equipo marca Thermo Scientific, modelo ICE 3000, siguiendo los procedimientos descritos en *Standard methods for the examination of water and wastewater*, 22.ª ed. (2012). Los indicadores microbiológicos se determinaron con reactivos de marca Collilert específicamente para saber la presencia o ausencia de coliformes totales y *E. coli*. Finalmente, para conocer los indicadores biológicos y determinar el BMWP-CR se siguió el procedimiento descrito en el Decreto N°33903-MINAE-S, denominado Reglamento para la Evaluación y Clasificación de la Calidad de Cuerpos de Agua Superficiales sobre macroinvertebrados acuáticos que fueron recolectados en cada sitio y posteriormente identificados y clasificados según familias y grupos funcionales.

Tratamiento de la información: Los resultados se organizaron en tablas por estación y año de muestreo, posteriormente, se evaluaron los resultados contra los valores establecidos en el Decreto para reconocer la calidad del agua superficial en las zonas de estudio.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Tabla 1: Parámetro fisicoquímicos determinados en el Río Rosales durante el período 2023 – 2025

Parámetro /Estación (Zona)	Tempe-ratura (°C)	Turbi-dez (NTU)	pH	SDT (mg/L)	Condu-ctividad (µS/cm)	Salini-dad (ppt)	DQO (mg/L)	NO_3^- (mg/L)	PO_4^{-3} (mg/L)	Fósfo-ro total (mg/L)	P_2O_5 (mg/L)	Nitróge-no total (mg/L)
Seca 2023 (Alta)	22,1	5,3	7,1	37,1	121,6	0,1	112,0	135,0	NR	NR	NR	NR
Seca 2023 (Media)	21,5	3,6	7,9	33,2	112,3	0,1	51,0	664,0	1,4	NR	NR	NR
Seca 2023 (Baja)	20,6	2,9	7,0	30,5	98,0	0,1	0,0	29,0	0,3	NR	NR	NR
LLuviosa 2023 (Alta)	19,5	15,8	4,0	24,6	77,8	0,0	0,0	15,9	1,5	NR	NR	NR
LLuviosa 2023 (Media)	20,6	18,1	5,4	33,6	109,0	0,1	160,0	22,5	1,3	NR	NR	NR
LLuviosa 2023 (Baja)	20,1	55,3	6,6	33,0	106,0	0,1	20,0	110,8	2,4	NR	NR	NR
Seca 2024 (Alta)	19,5	13,0	7,7	28,0	90,0	0,1	0,0	1,3	0,5	0,2	0,4	0,3
Seca 2024 (Media)	21,5	4,9	7,6	31,7	105,1	0,1	0,0	2,7	0,6	0,2	0,5	0,6
Seca 2024 (Baja)	21,5	11,3	7,5	34,0	113,1	0,1	0,0	1,6	0,7	0,2	0,5	0,3

LLuviosa 2024 (Alta)	24,0	25,6	7,6	36,4	72,9	0,1	7,0	23,2	1,7	0,6	1,4	5,2
LLuviosa 2024 (Media)	21,8	19,5	7,2	35,7	77,7	0,1	0,0	2,5	2,0	0,7	1,5	0,6
LLuviosa 2024 (Baja)	22,1	64,6	7,6	61,4	93,2	0,1	0,0	16,2	1,2	0,4	0,9	3,6
Seca 2025 (Alta)	20,2	5,8	5,9	141,1	140,5	0,1	0,0	3,2	3,5	1,2	2,6	0,7
Seca 2025 (Media)	19,6	4,1	5,6	162,7	163,7	0,1	0,0	4,2	3,5	1,2	2,6	1,0
Seca 2025 (Baja)	19,5	9,0	5,9	167,9	167,7	0,1	0,0	2,8	3,5	1,2	2,6	0,6
LLuviosa 2025 (Alta)	19,9	14,3	7,4	114,9	115,1	0,1	0,0	5,6	0,1	0,0	0,1	1,3
LLuviosa 2025 (Media)	21,4	26,2	6,7	130,4	133,2	0,1	0,0	6,1	0,0	0,0	0,0	1,4
LLuviosa 2025 (Baja)	22,5	59,0	8,2	135,8	135,8	0,1	0,0	6,8	0,8	0,3	0,6	1,5
Valor ideal	**< 30 °C**	**< 25**	**6,5 - 8,5**	**< 250**	**< 300**	**< 50**	**< 20**	**< 5**	**≤ 0,1**	**≤ 0,05**	**< 0,05**	**< 0,5**

Nota: NR (determinación no realizada)

En conjunto, la Tabla 1 evidencia variación estacional, con aumentos de turbidez en época lluviosa (máximos en zona baja) y episodios de pH fuera del rango óptimo en 2023. Asimismo, destacan concentraciones elevadas de NO_3^- en algunos muestreos (incluyendo un valor extremo en la zona media durante la estación seca de 2023) y PO_4^{3-} por encima de los valores guía, lo que es consistente con aportes puntuales y difusos y con riesgo de eutrofización incipiente.

Tabla 2: Caracterización de indicadores de contaminación aniónica promedio por IC

Río Rosales: Zona (año)	*Concentración iónica en agua superficial (mg/L)*			
	Cloruros	**Nitratos**	**Fosfatos**	**Sulfatos**
Alta (2024)	2,5	**7,4**	1,3	8,7
Media (2024)	2,8	5,0	2,8	11,2
Baja (2024)	2,9	5,3	1,1	9,5
Alta (2025)	0,1	**6,8**	1,8	9,5
Media (2025)	0,2	4,2	1,8	12,6
Baja (2025)	0,2	5,6	2,2	13,2
VMA Decreto 33903	<100	<5	25	<150

Nota: VMA (valor máximo admisible)

La Tabla 2 muestra que los nitratos superan el VMA del Decreto en la mayoría de combinaciones zona-año, con excepción de la zona media en 2025. En contraste, cloruros y sulfatos se mantienen muy por debajo de sus VMA, por lo que el patrón observado apunta principalmente a presión por nutrientes nitrogenados.

Tabla 3: Determinación de la calidad del agua del Río Rosales según Índice Holandés en 3 años de estudio

Estación Seca	2023			2024			2025			
Parámetro / Zona Muestreo	**Alta**	**Media**	**Baja**	**Alta**	**Media**	**Baja**	**Alta**	**Media**	**Baja**	**Valor ideal**
Nitrógeno amoniacal (mg/L)	30,00	150,00	8,00	0,30	0,70	0,40	0,90	1,20	0,80	≤ 0,50
% Oxígeno disuelto	101,30	99,20	94,60	93,00	91,60	99,00	100,20	112,90	108,90	91-100 %
DBO_5 (mg/L)	2,00	18,00	15,00	1,00	17,00	25,00	3,00	18,00	20,00	≤ 3,0
Sumatoria de Puntos	8,00	11,00	10,00	3,00	8,00	7,00	4,00	10,00	8,00	3,00
Clase de Río	3,00	4,00	4,00	1,00	3,00	3,00	2,00	4,00	3,00	1
Clasificación de calidad	C. Moderada	C. Severa	C. Severa	Sin Contamin.	C. Moderada	C. Moderada	C. Incipiente	C. Severa	C. Moderada	Sin Contamin
Estación Lluviosa	2023			2024			2025			
Nitrógeno amoniacal (mg/L)	0,10	0,02	0,00	6,40	0,70	4,40	1,50	1,70	1,90	≤ 0,50
% Oxígeno disuelto	103,00	106,10	106,50	90,10	89,90	91,00	94,50	95,50	97,00	91-100 %
DBO (mg/L)	7,50	6,75	6,75	2,00	8,00	1,00	0,00	2,00	4,00	≤ 3,0
Sumatoria de Puntos	5,00	5,00	5,00	8,00	7,00	6,00	5,00	5,00	6,00	3,00

Clase de Río	2,00	2,00	2,00	3,00	3,00	2,00	2,00	2,00	2,00	1
Clasificación de calidad	C. Incipiente	C. Incipiente	C. Incipiente	C. Moderada	C. Moderada	C. Incipiente	C. Incipiente	C. Incipiente	C. Incipiente	Sin Contamin

El Índice Holandés (Tabla 3) clasifica la calidad desde 'sin contaminar' hasta 'contaminación severa', con un deterioro más marcado en estación seca (p. ej., zona media y baja en 2023; zona media en 2025) y una mejora relativa de la calidad del agua superficial durante la estación lluviosa con predominancia de contaminación incipiente (clase 2) en la mayoría de zonas y años, con excepción del 2024 (clases 3 en zona alta y media) que se explican debido al peso de nitrógeno amoniacal y la DBO_5 en la sumatoria de puntos.

Tabla 4: Cualificación microbiológica del superficial del Río Rosales.

Estación Año (Zona)	Coliformes Totales (NMP/mL)	E.Coli (UFC/100mL)
Seca 2023 (Alta)	Positivo	Positivo
Seca 2023 (Media)	Positivo	Positivo
Seca 2023 (Baja)	Positivo	Positivo
LLuviosa 2023 (Alta)	Positivo	Positivo
LLuviosa 2023 (Media)	Positivo	Positivo
LLuviosa 2023 (Baja)	Positivo	Positivo

La detección positiva de coliformes totales y *E. coli* en todas las zonas y estaciones evaluadas confirma contaminación fecal persistente y, por ende, riesgo sanitario asociado al contacto o uso del agua en actividades humanas.

Tabla 5: Calidad del agua del río Rosales utilizando índice BMWP-CR, durante tres años de estudio.

Río Rosales		Época Seca		Época lluviosa	
		Puntaje BMWP	Nivel de Calidad	Puntaje BMWP	Nivel de Calidad
2023	Arriba	102	Buena, sin contaminar	48	Mala, contaminada
	Medio	68	Regular, cont. moderada	62	Regular, cont. Moderada
	Bajo	68	Regular, cont. moderada	52	Mala, contaminada

2024	Arriba	48	Mala, contaminada	53	Mala, contaminada
	Medio	62	Regular, cont. moderada	61	Regular, cont. Moderada
	Abajo	52	Mala, contaminada	64	Regular, cont. Moderada
2025	Arriba	79	Regular, cont. moderada	53	Mala, contaminada
	Medio	53	Mala, contaminada	45	Mala, contaminada
	Abajo	70	Regular, cont. moderada	53	Mala, contaminada

El BMWP-CR (Tabla 5) muestra condiciones biológicas entre 'regular' y 'mala' en la mayoría de zonas y años, con descensos notorios en 2024 y valores consistentemente bajos en época lluviosa en varios tramos. Este resultado sugiere presiones sostenidas sobre la comunidad bentónica, incluso cuando algunos indicadores fisicoquímicos puntuales pueden mostrar mejoras estacionales.

Al contrastar ambos enfoques, el Índice Holandés (Tabla 3), basado en nitrógeno amoniacal, % de oxígeno disuelto y DBO_5, se refleja con rapidez la variación estacional y la dilución en época lluviosa, mientras que el BMWP-CR (Tabla 5) integra la respuesta biológica a presiones acumuladas y condiciones de hábitat a lo largo del tiempo. Esto permite, por ejemplo, visualizar que en la zona alta durante seca 2024, donde el Holandés clasifica 'sin contaminar' (clase 1), pero el BMWP-CR indica condición 'mala, contaminada' (48 puntos); y también en lluviosa 2023 en la zona alta, donde el Holandés señala contaminación incipiente (clase 2) mientras el BMWP-CR mantiene una condición biológica 'mala'.

Los resultados obtenidos (Tabla 1) demuestran que la calidad del agua del río Rosales presenta una variación temporal más marcada que espacial, lo cual coincide con lo reportado en otros ríos tropicales donde los cambios estacionales determinan la dinámica de contaminantes (Mendoza et al., 2020). Durante la época seca de 2023, se observan niveles reducidos de caudal y mayor concentración de contaminantes disueltos, reflejando concentraciones de nitratos y fosfatos particularmente elevadas (Tabla 1), alcanzando 664 mg/L NO_3^- en la zona media del año 2023; valores que, aunque son atípicos, podrían estar asociados a descargas industriales puntuales, además un total de 11 de 18 muestras fueron >5 mg/L NO_3^- y casi todas las mediciones de fosfatos (PO_4^{3-}) superaron el valor máximo recomendado de 0,05 mg/L (con excepción de una), según la normativa costarricense (Decreto N.° 33903-MINAE-S). Con esos niveles, Crain y Caskey (2010) anticipan eutrofización con cambios de

comunidades de algas y macroinvertebrados para cuerpos de agua superficiales. Estas descargas puntuales y no puntuales, probablemente asociadas principalmente a vertidos indebidos domésticos e industriales sin tratamiento previo son un fenómeno descrito en estudios regionales (Bolaños et al., 2025; Liyanage & Yamada, 2017), que se suman a la situación conocida pero poco discutida respecto al uso indiscriminado de fertilizantes en las fincas sembradas con caña, tomate y café en la zona.

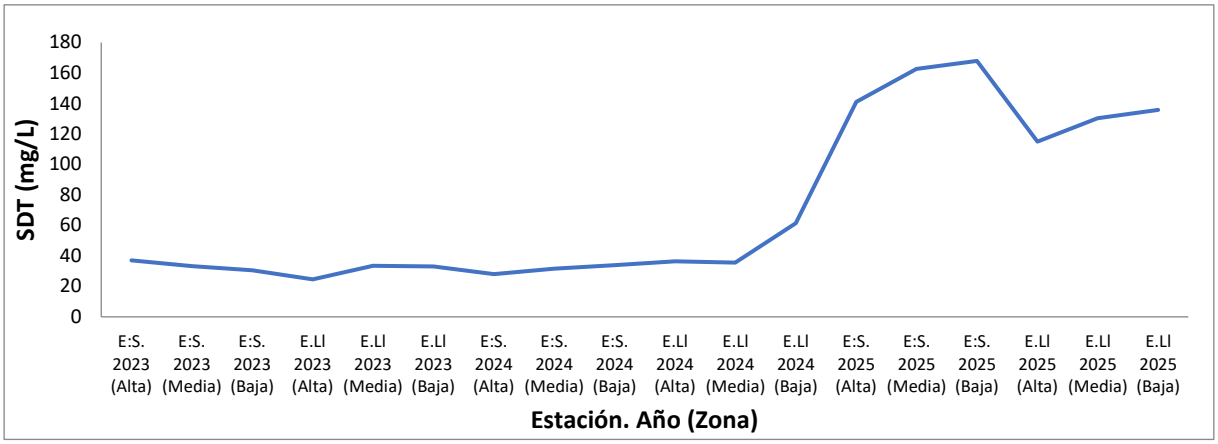
En ese mismo año se observa un episodio de valores de pH ácidos durante la estación lluviosa (ver Tabla 1), debajo del rango 6,5 - 8,5 considerado óptimo para aguas superficiales; un parámetro que no solo estresa a la biota acuática con una menor tasa reproductiva, sino que puede movilizar metales pesados del sedimento o las laderas, aumentando su biodisponibilidad y toxicidad para los organismos acuáticos, dado que existen estudios que han demostrado que una disminución del pH <6,0 incrementa la fracción iónica libre de metales como aluminio, hierro y otros, exacerbando sus efectos tóxicos en peces e invertebrados acuáticos (Qu et al., 2013).

En contraste, durante la estación lluviosa de 2024 y 2025 se evidenció una dilución relativa de contaminantes debido al mayor caudal, lo cual reduce las concentraciones de nutrientes y mejora la clasificación de calidad en ciertos tramos del río a clase 2 principalmente por la reducción importante de la DBO_5 (Tabla 3). Este patrón es consistente con el efecto de "lavado" reportado por FAO (1996), donde la escorrentía pluvial diluye contaminantes disueltos, aunque, paradójicamente, también transporta nutrientes y sedimentos que favorecen procesos de eutrofización en la parte baja del cauce. Los resultados mostraron dos picos de DQO (112 y 160 mg/L en la Tabla 1) para el año 2023, lo cual sugiere descargas importantes de lixiviados orgánicos que suelen provocar un aumento de nutrientes pues al descomponerse aportan nitrógeno y fósforo, lo que a su vez alimenta un ciclo de demanda de oxígeno y eutrofización simultáneamente (Dodds & Smith, 2016), afectando organismos como los peces y macroinvertebrados.

El comportamiento de los sólidos disueltos totales (SDT) (Figura 1) y los nitratos (Figura 2) refuerza la hipótesis de que existe un incremento paulatino de nutrientes a lo largo de los años de muestreo y a lo largo de la subcuenca. Estos parámetros pueden ser utilizados como indicadores de contaminación por fertilizantes agrícolas, aguas residuales y erosión de suelos (Rodríguez, 2024); pues la acumulación

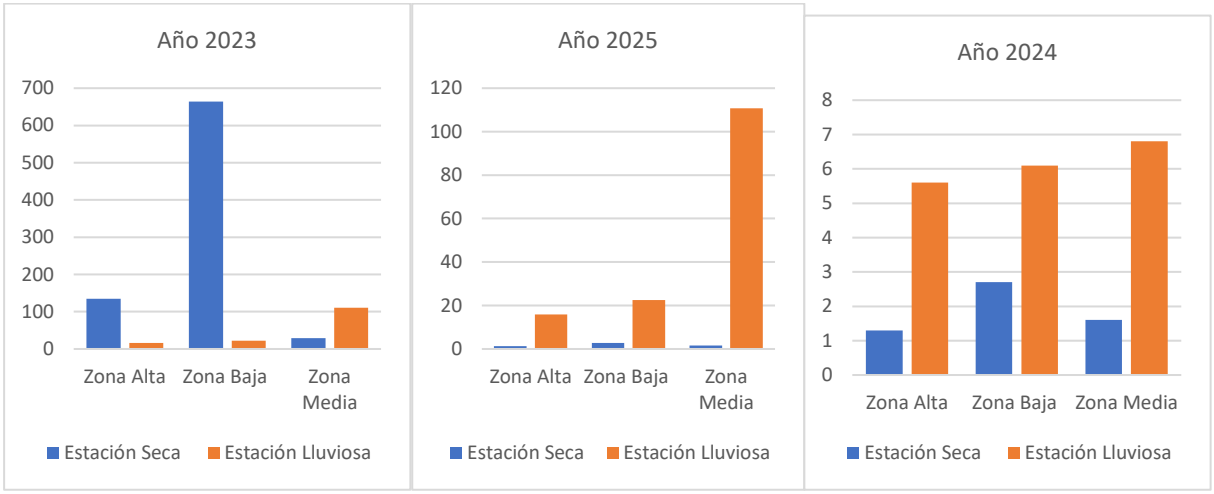
de nitrógeno y fósforo promueve un estado de eutrofización incipiente, evidenciado en la proliferación de algas y macrófitas, particularmente en la zona baja del río; un fenómeno descrito también en la cuenca del Tárcoles (Pérez-Gómez et al., 2021), y que se puede observar en la biota del río (figura 3).

Figura 1: Evolución de la concentración de SDT en el Río Rosales durante tres años de monitoreo.



Las lluvias intensas en cuencas urbanas y agrícolas como la del río Rosales, aunque inicialmente diluyen la concentración de contaminantes, simultáneamente aportan nutrientes y sedimentos, señal de que existe una acumulación progresiva de sales y nutrientes en el sistema (Pérez-Gómez et al., 2021). Esto sugiere que las fuentes difusas como fertilizantes de fincas, suelos erosionados, entre otras actividades agropecuarias están suministrando contaminantes de forma continua, cuyos efectos se suman a las descargas puntuales, es decir que se van depositando río abajo propiciando condiciones eutróficas, donde la falta de barreras naturales como bosque ribereño y el irrespeto de las zonas de protección agravan este efecto acumulativo.

Figura 2: Concentración de nitratos disueltos en agua del río Rosales, por zona de muestreo y año



La concentración de nitratos en la zona media durante la época seca de 2023 alcanzó valores muy altos que representan un riesgo crítico y que, aunque atípicos, se asocian con descargas industriales puntuales dado que exceden en más de 100 veces los límites establecidos por la normativa (<5 mg/L). La literatura señala que concentraciones tan elevadas alteran el equilibrio ecosistémico y reducen el oxígeno disuelto, afectando la diversidad biológica (García et al., 2017); al valorar la concentración promedio anual de aniones (Tabla 2) que son indicativos de contaminación principalmente de índole antropogénica, se denota una mayor estabilidad del río Rosales, sin embargo sigue prevaleciendo una concentración de nitratos que supera el valor máximo permitido por el decreto y es la especie química que denota más persistencia a lo largo del río.

El Sistema Holandés (Tabla 3) clasificó el río con calidades variables entre buena, sin contaminar en la zona alta durante la estación seca del año 2024, hasta agua con contaminación severe, principalmente en zonas bajas en dos de los tres años que se realizó el estudio (2023, 2024 y 2025). Este contraste refleja que los procesos de autodepuración natural del río son insuficientes para contrarrestar las cargas contaminantes, especialmente en época seca, donde la calidad del agua del río se aprecia con mayor variabilidad en la calidad de los tramos estudiados, pero que, disminuye en calidad conforme el río atraviesa los núcleos de población; durante la estación lluviosa, la dilución de los contaminantes mejora notablemente la calidad del agua superficial, categorizando el río principalmente con contaminación incipiente, es decir un río clase 2 en los años 2023 y 2025.

Además, la presencia sistemática de coliformes totales y *E. coli* en todas las zonas (Tabla 4) confirma una contaminación fecal típica en los ríos del valle central. Según la Organización Mundial de la Salud, la detección de *E. coli* es un indicador inequívoco de contaminación por excretas humanas o animales, que supone un riesgo sanitario directo para las comunidades que utilicen dichas aguas (Valverde, 2013; Ruiz, 2012), una situación compleja en el cantón de Grecia donde no existe un sistema de alcantarillado sanitario municipal, ni mucho menos una planta depuradora de aguas residuales, sino que existe un alcantarillado público que recibe aguas mal gestionadas que se descargan a los ríos.

Por su parte, el índice BMWP-CR (Tabla 5) evidenció un marcado descenso en la calidad biológica en 2024, incluso en la zona alta donde se registraron puntajes bajos que la clasificaron como "mala, contaminada". Esta discrepancia con el índice fisicoquímico confirma que los macroinvertebrados son más sensibles a cambios ambientales prolongados y captan alteraciones no detectadas en análisis puntuales (Mendoza et al., 2020). La reducción de taxa sensibles como Ephemeroptera y Trichoptera y el predominio de Dípteros tolerantes, como Simuliidae, son consistentes con un ecosistema sometido a estrés continuo (García et al., 2017).

En conjunto, los resultados sugieren que el río Rosales enfrenta un proceso de degradación ecológica progresiva, dominado por aportes difusos agrícolas, descargas urbanas sin tratamiento y el irrespeto a las zonas de protección. Esta situación compromete no solo la biodiversidad acuática sino también los usos potenciales del agua para consumo humano y actividades recreativas. Experiencias internacionales recomiendan medidas de gestión integral de cuencas que incluyan control de vertidos, fortalecimiento de plantas de tratamiento, monitoreo sistemático y restauración de bosques ribereños como medidas prioritarias (Dong et al., 2025; Liyanage & Yamada, 2017).

CONCLUSIONES

El análisis integral de los parámetros fisicoquímicos, microbiológicos y biológicos del río Rosales durante el período 2023–2025 permite concluir que este ecosistema acuático presenta una condición de contaminación incipiente a severa, con marcada variabilidad temporal entre la estación seca y lluviosa, donde casi la totalidad de las muestras de fosfatos excedieron los límites permisibles establecidos por la normativa nacional y los nitratos presentan un grado importante de estabilidad a lo

largo del río, lo que evidencia un enriquecimiento crítico en nutrientes que favorece procesos de eutrofización en el cauce principalmente en la zona baja. A ello se suman concentraciones elevadas de otras especies químicas como la demanda bioquímica de oxígeno (DBO), lo que reafirma la presencia de cargas orgánicas significativas provenientes de actividades agrícolas y vertidos domésticos.

Las diferencias de calidad observadas entre los resultados del índice fisicoquímico holandés y el índice biológico BMWP-CR resalta que los macroinvertebrados acuáticos son indicadores más sensibles a la presión contaminante acumulada, reflejando deterioros en la calidad del agua incluso en sitios donde los parámetros fisicoquímicos muestran aparentes mejoras. Esta evidencia refuerza la necesidad de integrar metodologías múltiples de monitoreo para una evaluación más precisa de la calidad hídrica.

El río Rosales enfrenta un proceso de degradación ecológica progresiva, situación que demanda la implementación de estrategias de gestión integral de cuenca, que incluyan el fortalecimiento de plantas de tratamiento de aguas residuales, aseguren procesos de fertilización de suelos ambientalmente seguros, promover una restauración de la cobertura boscosa en la zona de protección del río a lo largo de todo su cauce y mantener un monitoreo continuo bajo enfoques interdisciplinarios, a fin de disminuir el deterioro, garantizar la integridad ecológica del ecosistema y reducir los riesgos sanitarios para las poblaciones locales.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

American Public Health Association, American Water Works Association, & Water Environment Federation. (2012). *Standard methods for the examination of water and wastewater* (22nd ed.). American Public Health Association.

Bolaños Alfaro, J. D., Gutiérrez Jara, Y., & Sancho Calvo, M. (2025). Calidad de agua superficial en ríos del Cantón de Grecia, como indicador de impacto antropogénico frente al cambio climático. *South Florida Journal of Environmental and Animal Science, 5*(1), e5095. https://doi.org/10.53499/sfjeasv5n1-002

Crain, A. S., & Caskey, B. J. (2010). *Breakpoint analysis and relations of nutrient and turbidity stressor variables to macroinvertebrate integrity in streams in the Crawford-Mammoth Cave Uplands Ecoregion,*

Kentucky, for the development of nutrient criteria (Scientific Investigations Report 2010–5164). U.S. Geological Survey. https://pubs.usgs.gov/sir/2010/5164/pdf/sir2010-5164.pdf

Dodds, W. K., & Smith, V. H. (2016). Nitrogen, phosphorus, and eutrophication in streams. *Inland Waters, 6*(2), 155–164. https://doi.org/10.5268/IW-6.2.909

Dong, H., Zhang, R., Wang, X., Zeng, J., Chai, L., Niu, X., Xu, L., Zhou, Y., Gong, P., & Yin, Q. (2025). Geographical features and management strategies for microplastic loads in freshwater lakes. *npj Clean Water*, 8, 29. https://doi.org/10.1038/s41545-025-00459-1

García, J. M., Sarmiento, L. F., Salvador, M., & Porras, L. S. (2017). Uso de bioindicadores para la evaluación de la calidad del agua en ríos: aplicación en ríos tropicales de alta montaña. Revisión corta. *UGCiencia*, *23*(1), 47-62. http://hdl.handle.net/11396/2259

Food and Agriculture Organization (FAO). (1996). *Los fertilizantes, en cuanto contaminantes del agua*. En Fertilizantes y medio ambiente (Cap. 3). FAO, Roma. https://www.fao.org/3/w2598s/w2598s05.htm

Hanna Instruments. (s. f.). *Manual de instrucciones: Fotómetro multiparamétrico HI83399 con DQO*. Woonsocket, Rhode Island, EE. UU.: Hanna Instruments Inc. Disponible en https://www.hannacolombia.com

Mendoza, S. L., Pineda, H., Londoño, Á. M., Rivera, D. S., & Arévalo, J. L. (2020). Macroinvertebrados acuáticos como indicadores de calidad del agua del río Teusacá (Cundinamarca, Colombia). *Ingeniería y Desarrollo, 37*(2), 269–288. https://doi.org/10.14482/inde.37.2.6281

Liyanage, C., & Yamada, K. (2017). Impact of population growth on the water quality of natural water bodies. *Sustainability, 9*(8), 1405. https://doi.org/10.3390/su9081405

Pérez-Gómez, G., Alvarado-García, V., Rodríguez-Rodríguez, J. A., Herrera, F., & Sánchez-Gutiérrez, R. (2021). Calidad fisicoquímica y microbiológica del agua superficial del río Grande de Tárcoles, Costa Rica: un enfoque ecológico. *Cuadernos de Investigación UNED, 13*(1), e3148. https://doi.org/10.22458/urj.v13i1.3148

Qu, R., Wang, X., Liu, Z., Yan, Z., & Wang, Z. (2013). Development of a model to predict the effect of complexing agents on the acute toxicity of cadmium to *Photobacterium phosphoreum*. *Journal of Hazardous Materials, 262*, 288–296. https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2013.08.039

Rodríguez Mendoza, L. S. (2024). Análisis del efecto de las prácticas de producción piscícola en Colombia sobre la calidad del agua, considerando como caso de estudio la estación piscícola San José del Nus, 2019–2023. https://hdl.handle.net/10495/43191

Ruiz Fallas, F. (2012). Gestión de las excretas y aguas residuales en Costa Rica [Informe técnico]. ICE–AyA. https://dspaceaya.igniteonline.la/bitstream/handle/aya/374/CEDO%20AyA%205051.pdf?sequence=1&isAllowed=y

Valverde, R. (2013). Disponibilidad, distribución, calidad y perspectivas del agua en Costa Rica. *Revista de Ciencias Ambientales*, 45(1), 5–12. https://doi.org/10.15359/rca.45-1.1