

Calidad de agua superficial en ríos del Cantón de Grecia, como indicador de impacto antropogénico frente al cambio climático

Surface water quality in rivers of the Canton of Grecia, as an indicator of anthropogenic impact in the face of climate change

DOI: 10.53499/sfjeasv5n1-002

Received in: Dec 02nd, 2024

Accepted in: Jan 15th, 2025

John Diego Bolaños Alfaro

Máster en Ciencias con énfasis en Gestión y Estudios de Impacto Ambiental / Escuela de Química / Universidad Nacional de Costa Rica
Departamento de Ciencias Naturales / Sede de Occidente, Recinto de Grecia / Universidad de Costa Rica
Alajuela. Costa Rica
Correo electrónico: john.bolanos@ucr.ac.cr

Yurlandy Gutiérrez Jara

Máster en Gestión del Turismo Sostenible / Universidad de Cooperación Internacional
Departamento de Ciencias Naturales / Sede de Occidente, Recinto de Grecia / Universidad de Costa Rica
Alajuela. Costa Rica
Correo electrónico: yurlandy.gutierrezjara@ucr.ac.cr

Mayorn Sancho Calvo

Licenciado en Laboratorista Químico / Universidad de Costa Rica
Laboratorio de Química / Sede de Occidente, Recinto de Grecia / Universidad de Costa Rica
Alajuela. Costa Rica
Correo electrónico: mayron.sancho@ucr.ac.cr

RESUMEN

El presente artículo destaca la importancia de conocer la calidad del agua superficial específicamente en once ríos ubicados en el cantón de Grecia a partir de la determinación de su calidad físico química y biológica; se analiza la relación de las zonas de vulnerabilidad hídrica del cantón versus la problemática particular que presenta cada río, con el fin de propiciar la definición de estrategias hacia la mitigación tanto del impacto de las actividades humanas, así como de las relacionadas con el cambio climático.

La metodología implicó mapear e inventariar los ríos y correlacionar el impacto de las actividades antropogénicas con la calidad del agua superficial basado en el Sistema Holandés, evaluando además la calidad del agua con el BMWP-CR (Biological Monitoring Working Party modificado para Costa Rica), y considerando las zonas de vulnerabilidad, utilizando macroinvertebrados como bioindicadores y especies químicas específicas como indicadores ambientales entre ellas nitratos, fosfatos, nitrógeno amoniacal, DQO y DBO₅. Los resultados obtenidos en el primer muestreo de verano 2023 en 33 sitios analizados respecto a los valores establecidos en el Decreto N° 33903-MINAE-S, mostraron que catorce puntos se clasifican con una contaminación incipiente, mientras que ocho tuvieron una contaminación moderada y ocho una contaminación

severa; solamente tres estuvieron libres de contaminación. Se encontraron un total de 11943 macroinvertebrados distribuidos en 30 familias, siendo la familia más abundante Simuliidae. Al comparar resultados de macroinvertebrados en muestreos de verano e invierno, se observó una mejor calidad de agua en los sitios durante el verano dada la estabilidad de los causes; no obstante, los resultados arrojan que solo tres tramos de los ríos: Pilas, Prendas (ambos en zona alta) y Agualote (zona media), tienen calidad de agua apta para el ecosistema y para utilización humana, es decir sin contaminación.

Palabras clave: calidad de las aguas superficiales, bioindicadores de la calidad del agua, indicadores químicos de la contaminación del agua, calidad del agua en los ríos.

ABSTRACT

This article highlights the importance of knowing the quality of surface water specifically in rivers located in the canton of Grecia from the determination of its physical, chemical, and biological quality; The relationship between the water vulnerability zones of the canton is analyzed versus the particular problems presented by each river, to promote the definition of strategies towards the mitigation of both the impact of human activities, as well as those related to climate change.

The methodology involved mapping and inventorying the rivers and correlating the impact of anthropogenic activities with the quality of surface water based on the Dutch System, also evaluating water quality with the BMWP-CR (Biological Monitoring Working Party modified for Costa Rica) and considering the zones of vulnerability, using macroinvertebrates as bioindicators and specific chemical species as environmental indicators, including nitrates, phosphates, ammoniacal nitrogen, COD and BOD₅. The results obtained in the first sampling of summer 2023 in 33 sites analyzed concerning the values established in Decree N° 33903-MINAE-S, showed that fourteen points are classified as having incipient contamination, while eight had moderate contamination and eight had severe pollution; only three participants had free of contamination. A total of 11,943 macroinvertebrates were found distributed in 30 families, the most abundant family being Simuliidae. By comparing summer and winter results, better water quality will be verified at the sites during the summer given the stability of the causes; However, the results show that only three sections of the rivers: Pilas, Prendas (both in the upper area) and Agualote (middle area), have a water quality suitable for the ecosystem and for human use, that is, without contamination.

Keywords: surface water quality, water quality bioindicators, chemical indicators of water pollution, water quality in rivers.

1 INTRODUCCION

Pocas veces el estado y la sociedad misma se preocupa realmente de cuál es la calidad del agua que fluye sobre nuestros ríos; pese a que existen muchos estudios en la materia, la mayoría son productos aislados de ríos específicos que pretenden atender normalmente una problemática de origen antropogénico acontecida en el sitio y que amenaza su calidad.

Las actividades humanas cotidianas, ejercen presión sobre la capacidad depuradora de los ríos, aumentando el tiempo que tarda un río en recuperarse a su estado natural; asegurar la calidad del agua superficial es una acción necesaria para satisfacer la economía, el desarrollo social y las propias necesidades que tiene el uso del recurso hídrico ya sea para consumo, agropecuario, transporte, industrial, riego, recreación, descarga residual, entre otros usos (Mena et al., 2018).

Las aguas superficiales son afectadas de manera significativa por el cambio climático, lo que altera la capacidad hídrica, patrones de precipitación, aumentando la frecuencia y severidad de las tormentas y las temperaturas, situación que afecta la calidad del agua superficial (de Jonde et al, 2002).

Cambios en los patrones de precipitación resultan en sequías o inundaciones que ocurren con más frecuentes y severidad, resultando en impactos negativos para la calidad y cantidad del agua superficial, el arrastre de sedimentos con la pérdida de suelos y en particular el cambio atípico en la calidad del agua que fluye sobre los ríos. (Arce-Villalobos et al, 2022)

En el Recinto de Grecia de la Universidad de Costa Rica, a partir del año 2023 se desarrolla un proyecto de investigación que busca determinar la calidad del agua superficial de los principales ríos que se ubican geográficamente dentro del cantón de Grecia.

Es importante considerar la relación con las zonas de vulnerabilidad hídrica establecidas por la Municipalidad de Grecia, se pretenden definir estrategias específicas para mitigar el impacto de las actividades antropogénicas en aquellos ríos que lo requieran, así como proveer al Gobierno local, SINAC, Dirección de Aguas, Ministerio de Salud, ASADAS, entre otras instancias, información actualizada de parámetros para determinar la calidad del agua superficial de los cuerpos de agua del cantón, que permita visualizar cambios propios del cambio climático (Ríos & González, 2021).

La finalidad de la investigación es brindar información para reducir la vulnerabilidad, aumentar la resiliencia, al atender y utilizar de una manera planificada los indicadores ambientales; y facilitar la toma las medidas de adaptación y contención necesarias para mitigar sus efectos sobre el agua superficial del área de estudio.

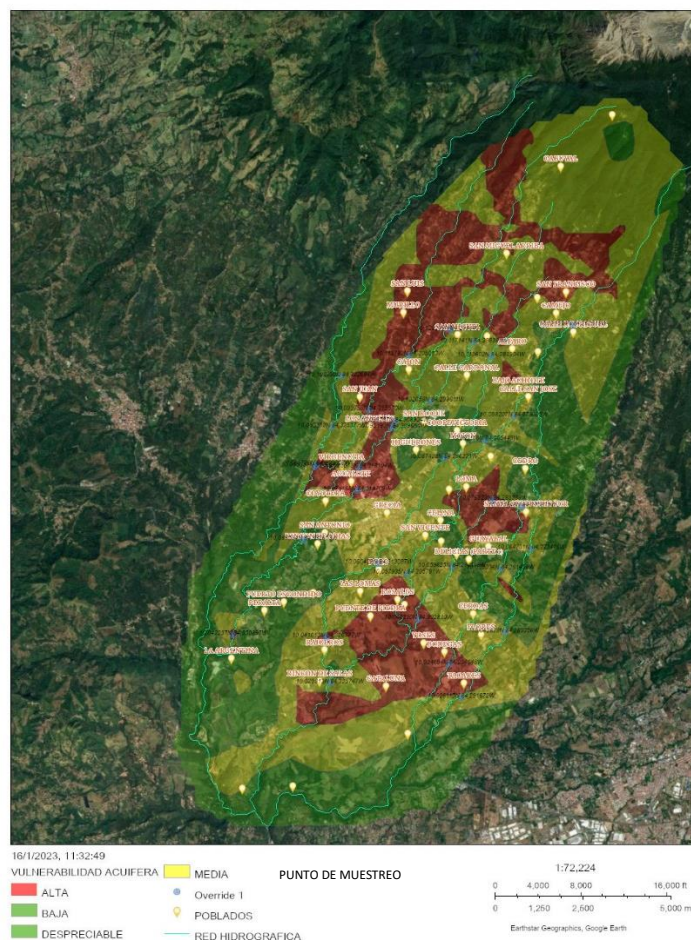
2 METODOLOGÍA

Ríos y geografía territorial: Se realizó un mapeo e inventario de los principales ríos y quebradas que fluyen sobre el cantón de Grecia; utilizando información

suministrada por la Dirección de Agua y la Municipalidad de Grecia y con el ánimo de conocer sus principales características, se georreferenciaron 33 puntos de muestreo, dentro de la subcuenca del río Grande de Alajuela. En total el estudio evalúa la calidad del agua en once ríos, considerando las zonas de vulnerabilidad hídrica (figura 1).

Se identificaron los ecosistemas de interés, así como las actividades antropogénicas más importantes que existen en los márgenes, y se correlacionó el impacto con respecto a la calidad de las aguas superficiales. Según el procedimiento de Gastezzi-Arias, *et al.* (2023) se evaluó la contaminación del agua superficial utilizando macroinvertebrados presentes como bioindicadores del estado de salud del ecosistema, además se utilizó la metodología referenciada en el reglamento de Calidad de Aguas Superficiales para Costa Rica, durante un período de tres años con realizando un muestreo tanto en período de verano como en invierno. (MINAE, 2007).

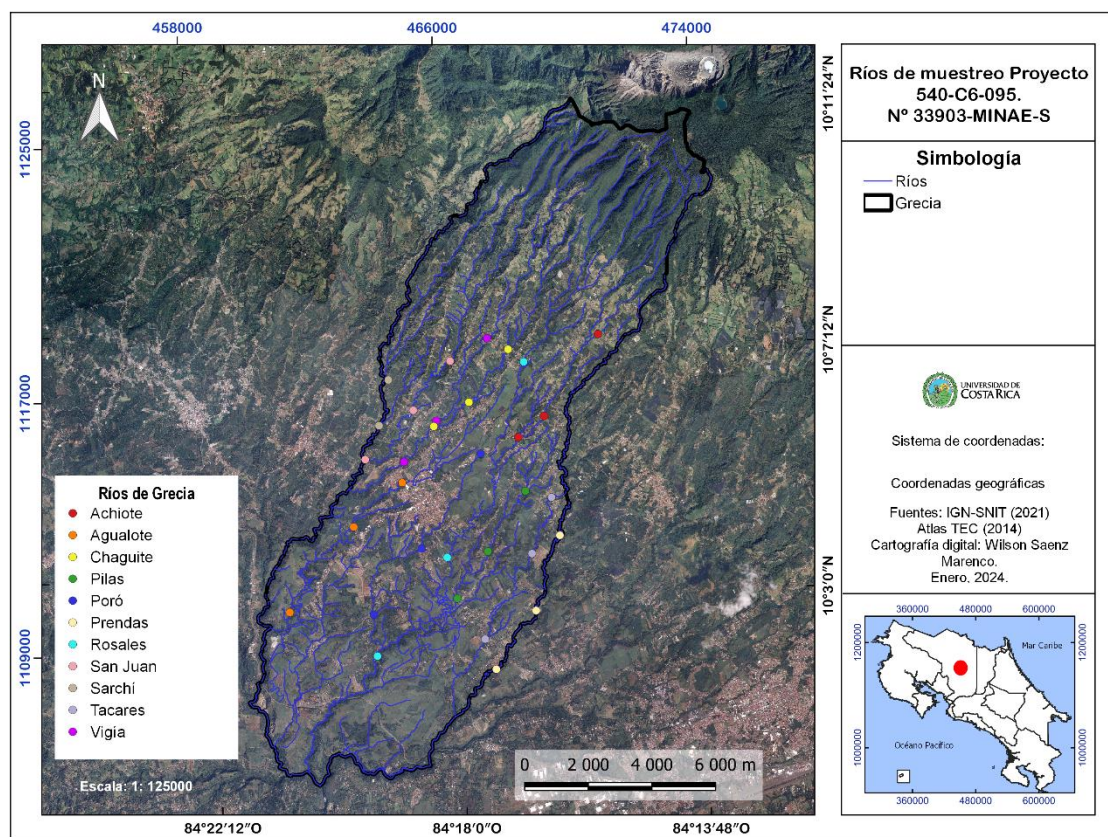
Figura 1. Principales poblados y zonas de vulnerabilidad hídrica en el cantón de Grecia.



Fuente: Elaboración propia con Google Earth (2023).

Muestreo: Para asegurar representatividad de la información, los ríos de estudio designados son: Pilas, Prendas, Sarchí, Poró, Vigía, Rosales, Achioté, San Juan, Tacares, Chaguíte y Agualote (figura 2); logrando crear una línea base de información actualizada sobre la calidad de cada uno, en tres sectores georreferenciados de cada río, para lo cual se consideró su ubicación en la cuenca y la zona de vulnerabilidad hídrica. En cada sitio se tomaron datos *in situ*, así como muestras de agua y macroinvertebrados para analizar en el laboratorio de un total de 33 muestras por muestreo.

Figura 2. Ríos y punto de muestreo que se monitorean desde el Proyecto de Investigación 540-C6095 de la Universidad de Costa Rica.



Fuente: Elaboración propia (2024).

Procedimientos y cuali-cuantificación: Se siguieron los procedimientos del Standard Methods for the examination of water and wastewater, establecido por la Asociación Americana de salud pública (APHA por sus siglas en inglés) 1992, 18 edición, y el Manual de análisis de agua del Laboratorio de Química, 2015; para los análisis Físico-Químicos; haciendo uso tanto equipos de campo portátiles multiparámétricos, como equipos de análisis en el laboratorio, necesarios para cuantificar los siguientes parámetros: porcentaje de saturación de oxígeno (PSO), temperatura, turbidez, pH,

sólidos disueltos totales, conductividad, salinidad, demanda química de oxígeno (DQO), fosfatos, nitratos, nitrógeno amoniacal y demanda biológica de oxígeno (DBO₅).

También, se desarrolló la determinación de macroinvertebrados bentónicos en todos los puntos de muestreo, para definir BMWP-CR (Biological Monitoring Working Party modificado para Costa Rica), según Decreto N° 33903-MINAE-S, art. 13, apéndice 2, establecer la calidad del agua superficial.

Análisis de la información: Los datos se tabularon en tablas anuales, que contiene los resultados para los once ríos (figura 2); posteriormente se comparan los mismos contra los valores de referencia establecidos en el Decreto N°33903-MINAE-S, para finalmente transformar el conjunto de parámetros cuantificados en un dato cualitativo que definirá la calidad final de cada río según el nivel o grado de contaminación según el cuadro 1.

Cuadro 1. Cuadro de asignación de clases de calidad del agua según el Sistema Holandés de codificación por colores, basado en valores de PSO, DBO₅ y nitrógeno amoniacal. Fuente: Reglamento para la Evaluación y Clasificación de la Calidad de Cuerpo de Aguas Superficiales (Poder ejecutivo, 2007).

Clase	Sumatoria	Código de colores	Interpretación
1	3	Azul	Sin contaminación
2	4-6	Verde	Contaminación incipiente
3	7-9	Amarillo	Contaminación moderada
4	10-12	Anaranjado	Contaminación Severa
5	13-15	Rojo	Contaminación muy severa

Fuente: Decreto N°33903-MINAE-S (2007).

Se agregó en la caracterización de ríos el parámetro químico de fósforo, como un indicador de contaminación adicional, pues se comporta como una especie soluble con implicaciones eutróficas según su disponibilidad en el medio acuático. Para Ramírez (2021), es un indicador internacional dentro del ICA-NSF (un índice público) donde se reporta como fosforo total durante la evaluación de la calidad del agua superficial.

En el caso de macroinvertebrados, cada muestra fue clasificada en familia y especies, así como número de individuos para determinar las abundancias en cada sitio y aplicar el puntaje que se establece el método BMW-CR y determinar la calidad del agua según el siguiente cuadro 2.

Cuadro 2. Clasificación de la Calidad del Agua en función del puntaje total obtenido. Fuente: Reglamento para la Evaluación y Clasificación de la Calidad de Cuerpo de Aguas Superficiales (Poder ejecutivo, 2007).

Nivel de calidad	BMWP-CR	Color
Aguas de calidad excelente	>120	Azul
Agua de calidad buena, no contaminada o no alteradas de manera sensible	101-120	Azul
Aguas de calidad regular, eutrófica, contaminación moderada	61-100	Verde
Aguas de calidad mala, contaminadas	36-60	Amari- llo
Aguas de calidad mala, muy contaminadas	16-35	Na- ranja
Aguas de calidad muy mala extremadamente contaminada	<15	Rojo

Fuente: Decreto N°33903-MINAE-S, art. 13 (2007).

3 RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Calidad de aguas superficiales en ríos del cantón de Grecia

La protección del recurso hídrico es un tema ineludible si pensamos en los problemas que se generan por cambio climático; estudiar la calidad del agua superficial debe ser un proceso esencial durante el desarrollo social y económico en cada cantón del país (Cortés, 2014).

Desde el año 2015 la Dirección de Aguas en Costa Rica inició un proceso donde estudia y da seguimiento a la calidad de varios ríos de Costa Rica, ofreciendo la información de manera pública en el Sistema Nacional de Información para la Gestión Integrada del Recurso Hídrico como parte del Plan Estratégico Institucional de Control y Protección del Recurso Hídrico (MINAE, 2021).

Esta es una forma para ordenar las intervenciones de manera estratégica y solventar las dificultades normativas, recurso humano y financieras que anteceden la gestión de los recursos hídricos; de tal forma, equivale a una acción afirmativa, dirigida a la eficiencia y la conjugación de esfuerzos en el ámbito institucional, interinstitucional y con las comunidades.

Para establecer la calidad de las aguas superficiales específicamente en Grecia, el modelo implementado de investigación que desarrolla la UCR caracteriza y proporciona una línea base de información científica muy similar, en este caso representativa a nivel cantonal; que además está enriquecida con indicadores de contaminación ambientales utilizados en otras latitudes al cuantificar la concentración de fosfatos presente en los ríos, para obtener un resultado que permita un análisis más integral, al definir la calidad de los cuerpos de agua superficiales dentro del territorio local.

Lo anterior, dado que la calidad de agua superficial en los ríos está intrínsecamente ligada a los procesos antropogénicos y al impacto que ellos puedan ejercer sobre el medio ambiente, exponiendo los cuerpos de agua superficiales a riesgos de contaminación que

pocas veces son evidenciados por la falta de control estatal tanto sobre el vertido de las aguas residuales de naturaleza doméstica e industrial, así como el de aguas negras y contaminadas con agroquímicos provenientes de las diversas actividades agropecuarias e industriales. Procesos en espiral que suman para el cambio climático y que repercuten sobre la economía del cantón, así como sobre propio ecosistema (Amador *et al*, 2018).

En tal sentido, las sequías por ejemplo, se sabe que conducen hacia una reducción considerable en los niveles de agua en los ríos, aumentando la concentración de contaminantes; el aumento en la temperatura en la época seca tiene efectos negativos en la calidad, aguas más cálidas promueven el crecimiento desmedido de algas y microorganismos patógenos que provocan una reducción del oxígeno disuelto e inducen la muerte de peces y otras alteraciones del ecosistema acuático (Morales-Ramírez *et al*, 2015).

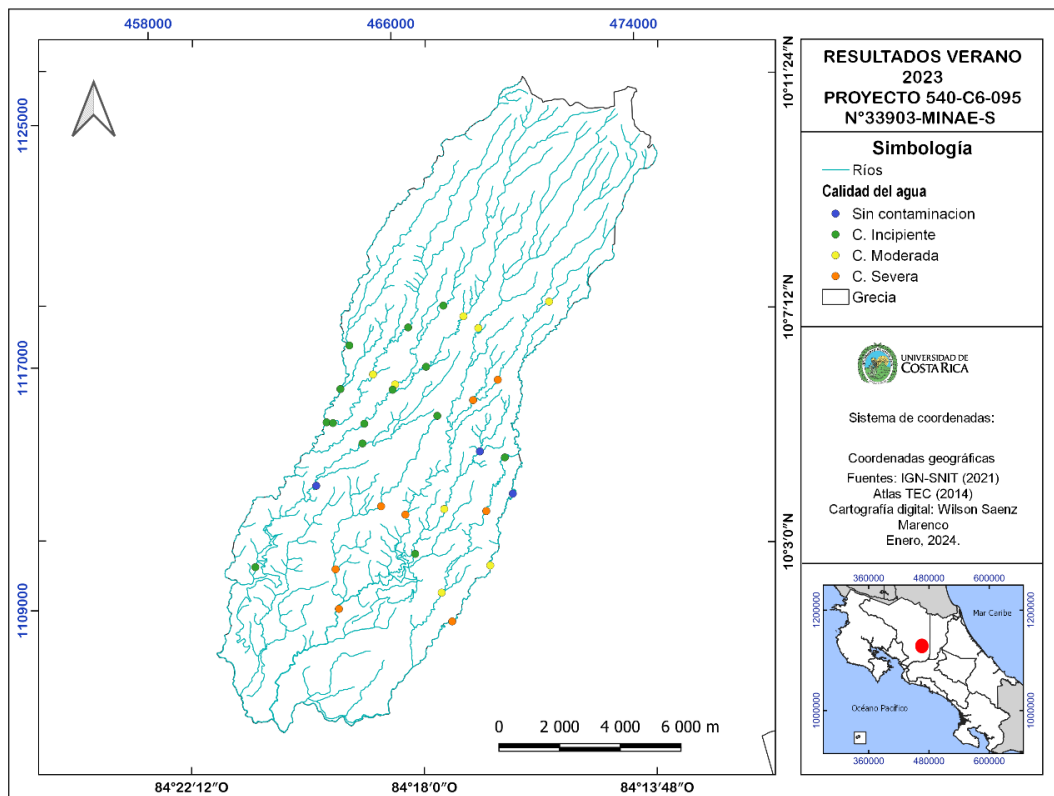
Prepararnos ante el cambio climático, significa monitorear la calidad del agua superficial como un indicador ambiental para comprender los impactos de estos cambios en nuestros recursos hídricos y el ecosistema asociado.

Según Ríos & González, (2021) lograr ciudades resilientes significa tener claro el rol que juega el cambio climático y la planificación urbana en distintos escenarios; incluso considerando diversas interacciones y su efecto multiplicador de riesgo de desastres o problemáticas, así como la propagación de enfermedades asociadas a eventos climáticos, con especial atención a las enfermedades transmitidas por el agua; de ahí que los programas de monitoreo ofrecen información no solamente sobre los parámetros de calidad del agua que se estudian, sino que permiten rastrear cambios en los mismos a lo largo del tiempo; con ello se pueden comprender mejor los impactos ecosistémicos y en qué medida modifican la calidad del agua superficial, e incluso valorar las sinergias que afectarán negativamente la calidad del agua en el río.

Los resultados de la calidad del agua superficial durante el periodo de verano del 2023 en once ríos dentro del cantón de Grecia se visualizan en la figura 3, donde el grado de contaminación en los ríos del Cantón de Grecia es variable: catorce puntos de muestreo presentan una contaminación incipiente, mientras que ocho tienen una contaminación moderada y ocho una contaminación severa; solamente tres están libres de contaminación. Los resultados tienen en alguna medida influencia por factores naturales, pero como se discutirá más adelante con detalle, el grado de contaminación de esta primer fotografía, obedece principalmente a factores de índole antropogénico, identificando además, contaminantes relacionados con especies nitrogenadas como nitrógeno

amoniaco y los nitratos; así como fosfatos, DBO, DQO y de manera visual la presencia de desechos sólidos, en todos los ríos.

Figura 3. Calidad de las aguas superficiales en el cantón del Grecia, según resultados obtenidos durante el verano, 2023.



Fuente: Elaboración propia (2024).

La información permite realizar una evaluación y valoración preliminar sobre el estado de los ríos, se puede considerar como una primer alerta la elevada cantidad de nutrientes presentes en varios ríos, situación que afecta tanto el ecosistema acuático y los procesos de disolución de iones a lo largo de cada río; en donde los excesos iónicos, evidentemente no tienen un origen natural, sino que son desequilibrios generados por las actividades humanas y que conducen a problemáticas mayores como la eutrofización. (Chislock et al., 2013).

Por otra parte, se encontraron un total de 11943 macroinvertebrados distribuidos en 30 familias, siendo la familia más abundante Simuliidae, la aplicación del Índice BMWP-CR para cada uno de los puntos muestreados se observan en el cuadro 3 y comprara los datos obtenidos en época seca y época lluviosa, siendo importante recalcar que en época seca se observa una mejor calidad de agua en los sitios, esto, debido a la estabilidad del ambiente. Por el contrario en temporada lluviosa se observan aumentos de

caudal, crecidas extremas, arrastres de sustratos, mayor turbidez que impide el paso de la luz y conllevan a disminución de crecimiento algas bentónicas, comprometiendo la redes tróficas, disminuyendo la calidad del agua en los sitios analizados. (Arce-Villalobos et al., 2022).

Cuadro 3. Calidad de las aguas superficiales de los 11 ríos en el cantón de Grecia, según índice BMWP-CR.

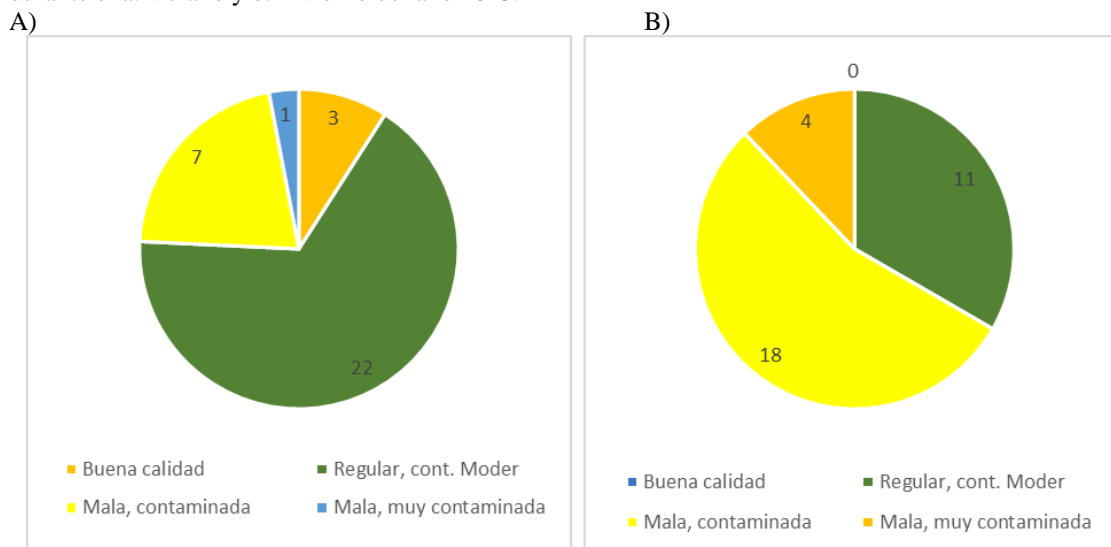
Río	Sitio	Época Seca		Época Lluviosa	
		Puntaje BMWP	Nivel de calidad	Puntaje BMWP	Nivel de calidad
Achiote	Arriba	86	Regular, cont. moderada	38	Mala, contaminada
	Medio	58	Mala, contaminada	83	Regular, cont. moderada
	Abajo	88	Regular, cont. moderada	67	Regular, cont. moderada
Prendas	Arriba	70	Regular, cont. moderada	48	Mala, contaminada
	Medio	87	Regular, cont. moderada	61	Regular, cont. moderada
	Abajo	50	Mala, contaminada	59	Mala, contaminada
Aigualote	Arriba	23	Mala, muy contaminada	34	Mala, contaminada
	Medio	66	Regular, cont. moderada	51	Mala, contaminada
	Abajo	72	Regular, cont. moderada	27	Mala, muy contaminada
Pilás	Arriba	82	Regular, cont. moderada	73	Regular, cont. moderada
	Medio	62	Regular, cont. moderada	60	Mala, contaminada
	Abajo	57	Mala, contaminada	64	Regular, cont. moderada
Tacares	Arriba	66	Regular, cont. moderada	73	Regular, cont. moderada
	Medio	83	Regular, cont. moderada	35	Mala, muy contaminada
	Abajo	36	Mala, contaminada	33	Mala, muy contaminada
Rosales	Arriba	102	Buena, no alt de m. s.	48	Mala, contaminada
	Medio	68	Regular, cont. moderada	62	Regular, cont. moderada
	Abajo	68	Regular, cont. moderada	52	Mala, contaminada
Poró	Arriba	65	Regular, cont. moderada	22	Mala, muy contaminada
	Medio	56	Mala, contaminada	39	Mala, contaminada
	Abajo	75	Regular, cont. moderada	41	Mala, contaminada
Chagüite	Arriba	90	Regular, cont. moderada	45	Mala, contaminada
	Medio	90	Regular, cont. moderada	55	Mala, contaminada
	Abajo	65	Regular, cont. moderada	59	Mala, contaminada
Sarchí	Arriba	91	Regular, cont. moderada	48	Mala, contaminada
	Medio	78	Regular, cont. moderada	61	Regular, cont. moderada
	Abajo	63	Regular, cont. moderada	48	Mala, contaminada
San Juan	Arriba	71	Regular, cont. moderada	60	Mala, contaminada
	Medio	72	Regular, cont. moderada	71	Regular, cont. moderada
	Abajo	109	Buena, no alt de m. s.	41	Mala, contaminada
Vigia	Arriba	102	Buena, no alt de m. s.	69	Regular, cont. moderada
	Medio	43	Mala, contaminada	61	Regular, cont. moderada
	Abajo	59	Mala, contaminada	55	Mala, contaminada

Fuente: Elaboración propia (2024).

Estos fenómenos de cambios en la dinámica de los ríos son observados claramente en el Río Rosales en su parte alta de la cuenca que cambio de una buena calidad con un puntaje de 102 en época seca, a aguas de mala calidad en época lluviosa con una puntuación de 48, dadas las perturbaciones que impiden el asentamiento de ciertas especies de macroinvertebrados.

Se puede observar en la figura 4 el aumento en el número de puntos con mala calidad, pasando de solo 7 a 18 sitios, y una disminución en los sitios con calidad regular que pasan a contaminación moderada, pasando de 22 a 11.

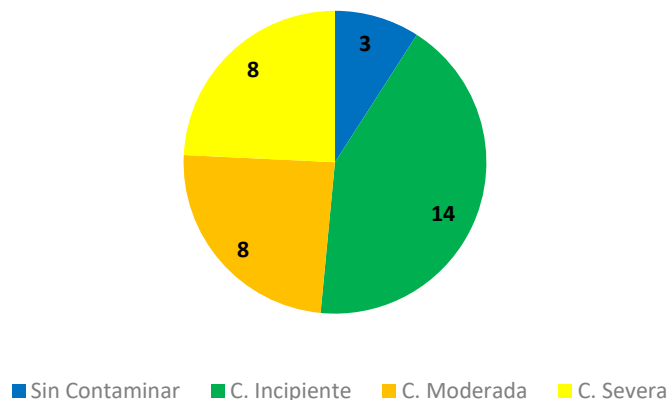
Figura 4. Clasificación de la calidad del agua superficial en 33 puntos de muestreo en once ríos muestreados durante el a. Verano y b. Invierno del año 2023.



Fuente: Elaboración propia (2024).

Durante periodo de verano 2023, se determinaron tres zonas limpias en tres ríos del estudio; sin embargo, catorce sitios más presentaron una contaminación incipiente, un grado de contaminación no peligroso para el ser humano pero que provoca cambios en el ecosistema acuático y que por ende deben ser monitoreadas con el ánimo de que no empeoren o de que en su defecto, se logren mejorar, tal y como lo muestra la figura 5.

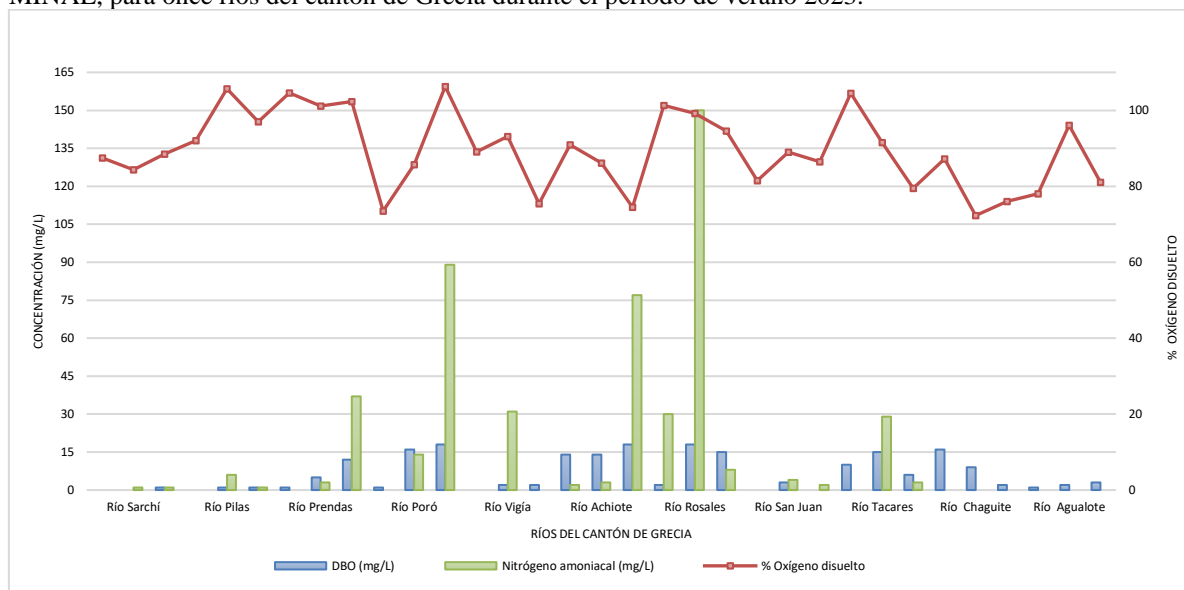
Figura 5. Clasificación de la calidad del agua superficial en 33 puntos de muestreo en once ríos muestreados durante el Verano 2023.



Fuente: Elaboración propia (2024).

Con respecto a los análisis físicoquímicos obtenidos preocupa el alto grado de contaminación en los ríos Rosales, Poró, Achiote, Prendas y Tacares, según se aprecia en la figura 5, donde los bajos porcentajes de oxígeno disuelto son consistentes con zonas que tienen una elevada demanda biológica de oxígeno y una alta concentración de nitrógeno amoniacal.

Figura 6. Resultados de los parámetros que definen la calidad de las aguas superficiales según decreto 33903-MINAE, para once ríos del cantón de Grecia durante el periodo de verano 2023.



Fuente: Elaboración propia (2024).

Según Gilbert y Wendell (2008), estudiar y visualizar dicho fenómeno o problema ambiental, y lograr establecer el origen, debe ser una prioridad; señalan como factores causantes, el mal manejo de aguas residuales domésticas e industriales, el uso desmedido de fertilizantes y el consecuente arrastre por lixiviación y escorrentía de especies nitrogenadas y fosforadas que provocan el incremento de algas, y por ende de biomasa en descomposición que consumirá buena parte del oxígeno disuelto, impidiendo al río mantener las condiciones de vida normales.

De ahí que la investigación ofrece datos relevantes que permiten conocer y prevenir o incluso corregir a tiempo una problemática específica, con el ánimo de no repetir patrones de contaminación como los suscitados el río Tárcoles, principal zona de vertimiento de residuos de todo tipo de la GAM, sitio donde reside la mayor parte de la población costarricense, que sufre un impacto todavía mayor, debido al vertimiento de aguas provenientes de la zona industrial más grande de Costa Rica (Mora-Alvarado, 2001).

Monitorear los ríos del cantón en las diferentes comunidades de Grecia dotan de información y conocimiento sobre el grado de contaminación que sufren las aguas que fluyen en su territorio, lo que facilita la coordinación y atención a tiempo tanto de las autoridades competentes, como sociedad civil interesada.

Principales hallazgos

Río Agualote: Se ubica entre las cuencas de los ríos Sarchí y Rosales, se caracteriza por tener una subcuenca angosta, con un patrón de drenaje poco desarrollado que tiene con cuatro tributarios permanentes en época lluviosa, circulando hacia distintas poblaciones del cantón, entre ellas Grecia Centro, Cooperativa y San Roque. Durante un recorrido sobre su rivera, se aprecia una cantidad importante de residuos sólidos, identificando afluentes con aguas residuales provenientes de actividades agropecuarias e industriales, así como de alcantarillado de los sectores de población supra hasta desembocar en el Río Grande.

Mediante procesos de observación en sitio, se aprecia que el río está sucio, presenta malos olores en los tres sitios definidos para muestreo, los cuales coinciden con las zonas de vulnerabilidad hídrica alta establecidas por la Municipalidad de Grecia.

Según información periodística en Noticias Occidente, del mes de abril 2022, en este río aparecieron peces muertos; a raíz de esto, un estudio de TCU de la UCR del año 2022, muestreó diez puntos del río, concluyendo que durante la época de verano ocurre una contaminación más notoria que durante el invierno, catalogando su calidad con contaminación severa la zona alta del Río, así como en el sector de Cooperativa y en el Bajo Polo, según el Índice Holandés aplicado por Castillo (2022). El estudio indica que existe contaminación moderada en Calle los Higueros, en el residencial El Ingenio y en Calle Peter; los demás puntos de muestreo presentaron un grado de contaminación incipiente.

El primer muestreo de verano en febrero de 2023; arroja como resultados preliminares del estudio, que el río refiere para el mes de marzo del 2023 una contaminación incipiente a lo largo del mismo en sus aguas superficiales según la normativa nacional. Denotando como principal alteración una elevación gradual de la DQO conforme circula en la cuenca iniciando con 78 mg/L en la parte alta hasta 183 mg/L en la zona cercana de la desembocadura en el río Grande (MINAE, 2007).

En cuanto a el BMWP-CR tanto en época seca como lluviosa el sitio más contaminado se presentó en la parte alta del río, donde sus aguas son de mala calidad,

muy contaminada, resaltando la presencia de las familias de Chironomidae (Diptera) y Physidae (Molusca), especies tolerantes a altas contaminación. En los sitios río abajo mejora la calidad del agua pasando a aguas regulares con contaminación moderada aumentado la diversidad de familias presentes, en la que se destaca la presencia de efemerópteros y tricópteros.

Río Vigía: Su cauce viaja en dirección suroeste sobre el cantón con una cuenca angosta que según Vargas y Fernández (2002), se ubica sobre una zona muy importante por el contenido de agua subterránea que drena de forma paralela al río y que aunado a los acuíferos de Colima y Barba ubicados más al este, abastecen de agua buena parte de la población del Valle Central. El río atraviesa distintas poblaciones a lo largo del distrito de San Roque y parte del distrito Central.

El muestreo realizado en marzo del 2023, enmarca la calidad del río con contaminación incipiente en la zona alta y baja, y con contaminación moderada en la zona media, esto debido al incremento poblacional en esa zona; además, el agua superficial presentó un valor pH ligeramente ácido que se sostiene a lo largo de la cuenca en un rango de 6,22 - 6,93, así como un alto contenido de nitratos llegando a alcanzar los 113 mg/L como valor máximo, debido probablemente a la actividad agrícola con café y caña. La demanda química de oxígeno en el río se incrementa según bajamos en su cuenca, con valores de 32, 73 y 89 mg/L respectivamente.

En cuanto al análisis con macroinvertebrados el río presentó una mejor calidad aguas arriba y mayor número de familias resaltando la abundancia en familias de dípteros, coleópteros y tricópteros; la calidad disminuyó aguas abajo al igual que el número de familias y aumenta la abundancia de individuos tolerantes a la contaminación como *Leptonema sp* y *Simulium sp*,

Río Tacaes: Su cause fluye dentro del distrito de Tacaes, recorriendo los poblados de Tacaes, Prendas, Bodegas, El Porvenir, Las Pilas y Cataluña, así como otros poblados del cantón de Poás; se ubica en un rango de altitud que va de los 700 a los 400 m.s.n.m.; su microcuenca tiene una extensión aproximada de 1800 hectáreas según Badilla y Solorzano (2020) y parte de sus aguas junto con las del río Prendas, conducen una descarga de agua subterránea que da origen a los manantiales denominados Los Chorros (Vargas y Fernández; 2002).

Durante la primera visita de campo, en la que se establecieron los puntos de muestreo, se aprecia en la parte alta de la microcuenca que la zona de protección del río es irrespetada con invasión habitacional. También son visibles las descargas del

alcantarillado con aguas grises de forma directa al río; no obstante, el alto volumen de agua que transita aun en período de verano favorece los procesos de dilución, así como el arrastre de desechos sólidos.

En los resultados fisicoquímicos sobresale el pH ácido de sus aguas en un rango de 5,68 – 5,83; la evidente contaminación con agua grises, junto a las actividades agrícolas en la zona, favorecen un aumento de la concentración de nitratos en un rango de 34,1 a los 111,0 mg/L, identificándose como agua de río no utilizable para cualquier actividad con excepción de generación hidroeléctrica. El río fluye bien oxigenado; no obstante, su calidad se clasifica con contaminación incipiente en la zona alta, contaminación severa en la zona media y con contaminación moderada en la zona más baja antes de su desembocadura en el Río Poás (MINAE, 2007).

En relación al análisis biológico la cuenta alta presentó aguas calidad regular, contaminación moderada, sin embargo, presenta gran abundancia de dípteros y coleópteros; en época lluviosa en el punto medio y bajo, la calidad del agua es mala y contaminada; donde disminuye considerablemente el número de familias presentes y aumenta la abundancia de familias como Hydropsychidae (Tricoptera) y Baetidae (Ephemeroptera), presentando más de 30 individuos mientras que las otras familias presentes no sobrepasan los 5 individuos.

Río Sarchí: el cauce pertenece a la microcuenca del río colorado según Monge (2020), dicha cuenca se caracteriza por ser ancha en su parte alta y media, y angosta en el último tercio de su longitud; el río divide geográficamente los cantones de Grecia y Sarchí recorriendo comunidades del costado este de su rivera como San Juan, San Luis, Los Ángeles, La Virgencita, La Coyotera, para desembocar finalmente en el Río Colorado.

Los resultados de verano 2023 definen una contaminación incipiente en los tres puntos muestreados, con presencia de fosfatos en un rango de 2,0 a 3,8 mg/L, un parámetro no definido en el decreto pero que es un indicador de contaminación antropogénica debido a que se produce a partir de vertimientos industriales, lodos de aguas residuales, así como en lixiviado y escorrentía de fertilizantes. (Calvo, 2019).

Además, el anión forma parte en la composición de detergentes y están presente en los desechos orgánicos producidos por las actividades pecuarias y como se sabe favorece procesos eutróficos en los ríos, debido al crecimiento descontrolado de la biomasa acuática, que para el momento de la visita ya es evidente (Fuentes, 2018).

En época seca el sitio presentó en todo su cauce aguas de calidad regular, con contaminación moderada destacando una mayor abundancia en familias de coleópteros (Dryopidae), tricópteros (Hydropsychidae) y efemerópteros (Baetidae), en época lluviosa la calidad de las aguas disminuyó en la parte alta y baja, pasando a aguas de calidad mala, contaminadas y aumentando la presencia de especies como *Leptonema sp* llegando hasta 160 individuos y *Simulium sp* 65 individuos.

Río San Juan: al igual que los demás ríos estudiados, se ubica en la vertiente sur del volcán Poás; según Barrantes & Estrada (2016) en sus observaciones de campo realizadas durante el año 2013, señalan que la cobertura vegetal predominante en la zona es el bosque secundario, conteniendo las principales nacientes que abastecen comunidades aledañas de San Luis, Cajón, San Juan y Los Ángeles con aforos promedio de 1,12 L/s.

Sin embargo, los autores indican que existe una importante área con matorrales y potrero (cerca al 30% de territorio), que presionan de manera negativa los recursos naturales en términos de biodiversidad e hidrología, ya que afecta el volumen de recarga y sus aforos, así como la calidad de las aguas (Barrantes *et al*, 2016).

La visita de campo en el mes de marzo permitió confirmar que no se respetan las zonas de protección al río, con potreros que se extienden hasta la rivera con alto contenido de desechos sólidos orgánicos propios de la actividad pecuaria; además, se visualizaron muchos desechos sólidos tanto en el agua como en ambos lados del río, situación que se mantiene hasta la desembocadura en el río Sarchí. Los resultados aplicando el sistema holandés califican el río con contaminación moderada en su zona media, la cual coincide con la zona más poblada, y contaminación incipiente en la zona alta y baja. No obstante, mantiene una actividad biológica importante, logrando visualizar a simple vista cangrejos, peces pequeños, libélulas, entre muchos otros organismos vivos.

Se considera la zona media del río como el área de mayor impacto antropogénico, con una DBO de 3 mg/L, DQO de 40 mg/L, nitratos 13 mg/L, fosfatos 1,9 mg/L, 4 mg/L de nitrógeno amoniacal. Todos los parámetros no son elevados, pero denotan un riesgo de vulnerabilidad hídrica superficial principalmente, por ende, proporcionan una alerta temprana para revertir y minimizar el proceso de contaminación que sufre el cauce actualmente.

El río San Juan presenta una peculiaridad ya que en época seca el punto con mejor calidad en cuanto a BMWP-CR se presentó aguas abajo, sobresaliendo el gran número de familias presentes en el sitio como Perlidae y Glossosomatidae, familias poco tolerantes

a la contaminación, indicando aguas de calidad buena no contaminadas o no alteradas de manera sensible, a pesar de que aguas arriba presentaba moderada contaminación, sin embargo en época lluviosa la calidad del agua en este punto cambia y se convierte en aguas mala calidad, contaminadas, lo que refleja el efecto de las lluvias en la estabilidad de los ríos y la gran cantidad de contaminantes presentes en esta época.

Río Rosales: Es un río de importancia ecológica, no solo por tener la extensión más grande de las microcuencas del cantón de Grecia, sino también porque forma parte del Corredor Biológico Interurbano el Achiote (CBIA), que comprende varios distritos del cantón de Grecia, recorriendo distintos poblados de comunidades como San Isidro, La Argentina, Pilas, El Mesón, Coopevictoria, Rincón de Salas y Puente Piedra así como un importante sector del cantón de Poás (Plan de Gestión CBIA, 2017).

Además da origen a una de las fuentes o manantiales con mayor caudal de Grecia denominada fuente rosales con un caudal promedio de 277 L/s según Vargas & Fernández, (2002).

Durante el primer muestreo del 2023, en la parte alta de la microcuenca, el río presenta un buen caudal donde además se respetan las zonas de protección del río y no hay una presencia fácilmente visible de desechos sólidos; no obstante, en la zona media y baja tales condiciones cambian drásticamente, con la notoria invasión de las zonas de protección por parte de empresas de índole industrial, comercio, casas habitacionales, pastizales y cafetales; que reducen la calidad del agua superficial, definiéndola con contaminación severa según el índice holandés. (MINAE, 2007).

Se presenta una problemática provocada principalmente por una alta presencia de especies nitrogenadas: 150 mg/L de nitrógeno amoniacal y hasta 664 mg/L de nitratos en la zona media de la cuenca, valores que se vuelven muy preocupantes según la normativa aplicable.

En el sitio se presentó aguas arriba en época seca aguas de buena calidad, no contaminadas o no alteradas de manera sensible, sin embargo, en época lluviosa la calidad del agua cambió a mala calidad, contaminadas y disminuyendo a la mitad el número de familias presentes de 22 a 11, siendo siempre la simulidos la familia más abundante. En la zona media no hubo cambio en la calidad de las aguas. Y en la zona baja del río paso de aguas con contaminación moderada a contaminadas, siendo la familia simulidae la que cambio más en abundancia pasando de dos individuos en época seca a 50 en época lluviosa y familias con Hydrobiopsidae (Tricoptera) no se encontraron presentes en época de lluvia.

Río Prendas: Según Vargas & Fernández, 2002 sus aguas contienen la descarga del mayor manantial dentro del cantón de Grecia, con una descarga media de 999,4 L/s, del cual se abastecen comunidades de Tacares como Tacares Norte y Sur, Bodegas, El Porvenir, Cataluña y hasta finca La Argentina, así como varias comunidades de Atenas entre ellas Santa Eulalia, Barrio Mercedes y área Central de Atenas; todas ellas utilizan agua de origen subterránea que brota en la margen izquierda del río con calidad físico química y bacteriológica excelente apta para consumo humano, que se hace potable posterior al proceso de cloración básico que recibe por parte de las ASADAS para las comunidades de Grecia y de parte del AyA para las comunidades de Atenas.

El agua superficial de este río y otros ríos más pertenecientes a la microcuenca del Río Poás como el río Tacares, presentan un enriquecimiento natural de sulfatos; con valor medio de 8,69 mg/L según Laboratorio Químico de Ingeniería del ICE; debido a que dicha microcuenca está influenciada por los vientos del Atlántico que pasan sobre el volcán Poás y que facilitan la deposición atmosférica, condición que fue confirmada con isotopos estables (Monge, 2020).

De ahí que al establecer la calidad del agua superficial del cantón de Grecia, se decidió para el presente estudio no cuantificar los sulfatos en ninguno de los ríos del cantón; pues los aportes del Volcán Poás imposibilitan para el anión ser considerado como un indicador de contaminación de origen antropogénico; aunque se sabe que a partir de 200 mg/L tiene efectos nocivos sobre la salud humana (Bolaños-Alfaro, 2017).

Durante el primer muestreo se observó que desde la parte alta y hasta la mitad de la microcuenca, se encuentra respetada la zona de protección del río. Todo lo contrario a partir de este punto y hasta la parte baja del río, a la altura de la comunidad de Tacares, donde abundan las casas habitacionales, el comercio y un ingenio azucarero, que invaden visiblemente dicha zona.

Lo anterior genera un impacto negativo en la calidad del agua, el cual inicia prácticamente sin contaminación en la zona alta, pero que cambia a contaminación moderada en la zona media y contaminación severa la parte baja, al aplicar el sistema Holandés según decreto aplicable. Destaca por ejemplo que en el punto de muestreo más bajo de la cuenca, hay una alta DBO que llega a 12 mg/L, con una elevada concentración de nitratos que alcanza los 135 mg/L; lo anterior aduce con un alto grado de certeza, que la principal fuente de contaminación antropogénica obedece en primera instancia a las descargas de aguas negras existentes desde la zona media y baja del río; y en segunda instancia al factor agrícola predominante en el sector.

Por otra parte, el análisis de BMWP indicó que la calidad del agua no varía tanto en época lluviosa y seca; por ejemplo en la parte media tanto en verano como en invierno se presentó aguas de calidad regular; dentro de las familias más abundantes encontramos Simuliidae (Diptera) y Baetidae (Ephemeroptera), siendo uno de los pocos ríos donde se encontró la familia Glossosomatidae (Tricoptera).

Río Poró: recorre zonas del cantón densamente pobladas y eso conlleva un efecto de contaminación humana importante, cursando el extremo sur del distrito Central, así como comunidades ubicadas en El Poró, Montezuma, Raicero, Puente Piedra hasta desembocar en el río Rosales a la altura del sector de Rincón de Salas.

El Plan regulador y urbano del cantón de Grecia indica que el principal problema es la falta de un alcantarillado sanitario para una correcta evacuación de las aguas residuales domésticas e industriales, donde el 96% de dichas aguas es vertida sin ningún tratamiento a los ríos; solamente las aguas negras son confinadas en tanques sépticos y fosas sépticas, lo cual agrava más la situación pues generan focos de contaminación de las zonas de recarga acuífera, situación que paradójicamente debería preocupar a la ciudadanía y que a la fecha no es un tema que se discuta en instancias Municipales como el Consejo Municipal (Municipalidad de Grecia, 2021).

Además existe una importante cantidad de desechos sólidos que son depositados principalmente en puentes debido a la presión del desarrollo urbano y a la falta de gestión Municipal, pues la empresa que recoge la basura semanalmente no está dispuesta a recoger desechos no ordinarios, lo que conlleva a una contaminación química sobre los ríos y obstrucción, aumentando las posibilidades de desbordamiento, inundación y erosión de taludes. La Comisión Nacional de Emergencia, señala que el río Poró, junto con los ríos Tacares, Rosales, San Juan, Sarchí y Vigía presentan amenazas hidrometeorológicas debido a la ocupación de las planicies de inundación, y el desarrollo urbano sin planificación, así como al deterioro de las cuencas hidrográficas, al margen de las leyes que regulan el desarrollo urbano y forestal, generando serios problemas en construcciones de viviendas cercanas a los ríos en el cantón de Grecia (Municipalidad de Grecia, 2009).

En la primera visita de campo al río fue notorio el incremento de contaminantes conforme se baja en la microcuenca del Rosales; por ejemplo, el rango de concentración de nitratos va de 0 mg/L en la zona alta (primer punto de muestreo) hasta los 324 en la zona baja (tercer punto de muestreo). Igual comportamiento tienen otros indicadores de contaminación ambiental como el nitrógeno amoniacal en un rango de 0 – 89 mg/L o la

DBO con 1 -18 mg/L, la DQO de 73 a 129 mg/L; con una presencia de fosfatos en la zona más baja que alcanza un valor de 1,5 mg/L, cifra que si se compara con la Gerencia de Saneamiento y Calidad del Agua Mexicana, es 15 veces más alta de lo esperado para un río; de ahí que la calidad de sus aguas se clasifiquen con contaminación severa al aplicar el decreto N°33903-MINAE-S, con evidente nivel eutrófico cuando atraviesa la zona donde se ubica el Puente de Piedra, dada la alta presencia de macrófitas emergentes, algas, lanas y renacuajos.

Dicha estructura ubicada en el flanco suroeste del volcán Poás que según Ruiz & Suárez, (2017) fue formada por procesos de erosión diferencial en rocas volcánicas que han estado activas por miles de años en el río Poró, presenta como principal importancia la declaratoria de ser patrimonio natural de Costa Rica desde el 21 de abril de 1994 y se considera un sitio de potencial atracción turística para la comunidad de Puente Piedra y de Grecia en general.

El análisis de macroinvertebrados denota que el río presenta un menor puntaje en época lluviosa, resultando en aguas malas, muy contaminadas río arriba y aguas malas, contaminadas en la parte media y baja; al comparar la abundancia de familias en época seca y lluviosa, la misma disminuye considerablemente, siendo más marcado el cambio en aguas arriba donde se pasó de 12 familias presentes en época seca a tan solo 6 familias en la lluviosa; siendo la familia más abundante en el río la Hydropsychidae (Tricoptera), presentando siempre abundancias mayores a 25 individuos en cada punto del río.

Río Chagüite: Es un río de importancia para el distrito de San Roque pues recorre varias comunidades, entre ellas San Miguel, Carbonal y San Roque, desembocando en el Río Vigía en una zona de vulnerabilidad acuífera en San Roque abajo. De ahí que para mejorar y asegurar la calidad de río, existe en dicho distrito una organización denominada el Observatorio Ciudadano del Agua San Roque de Grecia-Río Chagüite, una OCA que realiza campañas periódicas de limpieza, monitoreo y educación relacionada con el cuerpo de agua, en asociación con la Alianza Nacional Ríos y Cuencas de Costa Rica desde el año 2018. Ambas organizaciones tienen por fin realizar un trabajo organizado que genere conocimiento y conciencia comunal, para asegurar el compromiso de los pobladores del distrito y así mantener el mayor bienestar del río, evitando procesos de contaminación no solo de sus aguas superficiales, sino también de las aguas subterráneas existentes.

Pese al trabajo comunal mencionado, en la visita al río se observó en la parte alta de la microcuenca, casas a los dos lados de la rivera que irrespetan las zonas de protección

del río; en la parte media y baja de la microcuenca se mantiene la invasión de la zona de protección pero predominantemente con actividades agropecuarias, específicamente café y ganado, lo que evidentemente afecta la calidad del agua debido a la materia orgánica presente con una DBO de 2 a 16 mg/L, que favorece además una reducción en el oxígeno disuelto con 76 mg/L en el sector más bajo de la cuenca; la DQO de igual manera se cuantificó en un rango de 0 - 17 mg/L y se destaca una consolidada concentración de fosfatos en un rango de 1,7 - 3,4 mg/L; condiciones que favorecen actualmente procesos eutróficos y permiten preliminarmente clasificar la calidad del río con una contaminación moderada en la zona alta e incipiente en las zonas media y baja de la microcuenca (de Jonge *et al*, 2002).

En cuando a la calidad del agua utilizando macroinvertebrados el río presenta aguas de calidad regular, eutrófica, con contaminación moderada en época seca, siendo las familias más abundantes Leptophlebiidae y Leptophlebiidae (Ephemeroptera), a aguas de calidad mala, contaminadas, en época lluviosa en todos sus puntos de muestreo, siendo la familia más abundante Simuliidae.

Río Pilas: Se ubica en la microcuenca del río Rosales, recorre las comunidades de La Arena, Las Delicias y Pilas en Tacares norte, desembocando en el Río Rosales.

El muestreo de verano de 2023 permitió preliminarmente clasificar la parte alta de río como una zona sin contaminación, con valores bajos de todas las especies cuantificadas; la zona media, denota un incremento del nitrógeno amoniacal con 3 mg/L y en la DBO con 5 mg/L, cambiando su clasificación a contaminación moderada; finalmente, cerca de la desembocadura el río Pilas alcanza los niveles más altos de contaminación clasificando las aguas con contaminación severa según el sistema holandés, en donde además las especies nitradas alcanzan valores elevados: 37 N-NH⁴ mg/L y 135 mg/L NO₃⁻². Finalmente, también existe una alta concentración de fosfatos con 4,9 mg/L, lo que está relacionado de igual manera con la intensa actividad agropecuaria y el irrespeto a las zonas de protección.

Este río aguas abajo fue uno de los pocos en el cual la calidad de las aguas mejoró en cuando al BMWP, ya que paso de aguas de calidad mala en época seca a aguas de calidad regular en época lluviosa y se mantuvo constante el número de familias presente en el punto de muestreo. Las familias más abundantes en temporada seca fueron Calopterygidae y Simuliidae y en lluvias Leptohyphidae y Simuliidae.

Río Achiote: igualmente pertenece a la microcuenca del río Rosales, nace en la reserva forestal del Poás, cursa poblados en la parte norte del cantón de Grecia, como San

Francisco, Calle Rodríguez, San Isidro, Calle San José, Calle El Achiote y Santa Gertrudis Norte, lugar donde desemboca en el Río Rosales.

El muestreo de verano 2023 define este río con contaminación moderada en la zona alta y con contaminación severa las zona media y baja. La mala gestión de las aguas residuales, desechos sólidos y falta de respeto a las zonas de protección de la rivera a lo largo del río, donde se aprecian zonas agrícolas, casas de uso habitacional y comercios, motivan que el río presente niveles elevados de nitrógeno amoniacal, en un rango de 2 a 77 mg/L y una DBO entre 14 - 18 mg/L. Llama la atención el incremento en la concentración de nitratos que sufre el río conforme transita los distritos de San Isidro y San José, dado que la primer muestra en la zona alta cuantificó 7 mg/L, mientras que en la zona más baja alcanza 280 mg/L, sin duda las actividades agrícolas afectan el río actualmente de manera importante.

La calidad del agua en el punto arriba paso de regular a mala utilizando BMWP, siendo la familia más abundante Leptophlebiidae y Simuliidae, en la parte media el agua paso de mala a regular y en la parte baja se mantuvo con aguas regulares, tanto en época seca como la lluviosa.

4 CONCLUSIÓN

Se deben implementar medidas de gestión administrativa municipal y estatal, urgentes para reducir la contaminación en los ríos del Cantón de Grecia; con especial atención a la fiscalización de las regulaciones que permiten el desarrollo de actividades agropecuarias que sean más sostenibles, sin irrespetar zonas de protección en los ríos del cantón, y en donde además se asegure el uso de buenas prácticas agrícolas que limiten o mejoren el uso y la cantidad de fertilizantes.

La sociedad civil organizada debe gestionar apoyo ante instituciones de Educación Superior Estatales y Privadas para desarrollar procesos continuos de educación y sensibilización comunal en materia ambiental y de cuidado agua como recurso vital para todos los procesos de desarrollo económico sostenibles.

Lamentablemente el primer muestreo 2023 denota que solo tres tramos de los ríos: Pilas, Prendas (ambos en zona alta) y Agualote (zona media), tienen una calidad de agua apta para el ecosistema y para utilización humana, es decir sin contaminación, de un total de treinta y tres puntos estudiados, sin duda es un momento idóneo para empezar a actuar de manera decidida en reducir los efectos negativos propios de la actuación humana, con miras a minimizar problemáticas actuales propias del cambio climático.

Es importante el monitoreo continuo de los cuerpos de agua para conocer la salud y visualizar los cambios en la calidad de los cuerpo de agua superficial; el análisis de los resultados de dicho monitoreo se convierte es una herramienta útil para la toma de decisiones y permite mejorar la calidad de los ríos estudiados.

Consideraciones finales y limitaciones de la Investigación

La variabilidad estacional de los ríos genera diferencias significativas en la calidad del agua entre los muestreos de verano e invierno, tanto para cuantificación de parámetros físico químico, como de macroinvertebros.

Muchas de las zonas de estudio en cantón de Grecia presentan dificultades de acceso topografía o restricciones por propiedad privada, lo que nos obligó al trabaja estratégico en ciertos puntos de muestreo.

Con base en los hallazgos de esta investigación, se sugieren fortalecer el conocimiento sobre la calidad del agua en el cantón de Grecia con muestreos periódicos para evaluar tendencias en la calidad del agua y detectar cambios asociados a factores climáticos o actividades humanas.

Próximas investigaciones deben incluir el estudio de microplásticos, metales pesados y contaminantes farmacéuticos en futuras investigaciones para obtener un diagnóstico más completo e integral de la contaminación en los ríos.

REFERENCIAS

- Amador, J; Ambrizzi, T; Arritt, R; Castro, C; Cavazos, T; Cerezo-Mota, R; Fuentes-Franco, R; Giorgi, F; Guiliani, G; Lee, H; Méndez-Peréz, M & Rivera, E. (2018). Putting into action the REGCM4.6 regional climate model for the study of climate change, variability and modeling over Central America and Mexico *Atmósfera*. Redalyc, 31(2), 185-188.
- Arce-Villalobos, K., Sánchez-Gutiérrez, R., Centeno-Morales, J., Marín-León, R & Rodríguez-Rodríguez, J-A. (2022). Calidad del agua superficial y presiones socioambientales en la microcuenca alta del río Poás. *Uniciencia*. 2022, vol.36, n.1, pp.382-404 (ISSN 2215-3470). <http://dx.doi.org/10.15359/ru.36-1.24>.
- Badilla, M., & Solórzano, W. (2020). El agua en la Región de Occidente de Costa Rica: un balance de la situación. San Ramon, Alajuela. Centro de Investigaciones sobre Diversidad Cultural y Estudios Regionales (CIDICER) Sede de Occidente, Universidad de Costa Rica.
- Barrantes, E, & Estrada, V. (2016). Riqueza del recurso hídrico y su relación con la cubierta vegetal en la Reserva Forestal Grecia, Alajuela, Costa Rica. *Research Journal of the Costa Rican Distance Education University* (ISSN: 1659-4266), 8(1), 11-15.
- Bolaños-Alfaro, J; Cordero-Castro, G & Segura-Araya, G. (2017). Determinación de nitritos, nitratos, sulfatos y fosfatos en agua potable como indicadores de contaminación ocasionada por el hombre, en dos cantones de Alajuela (Costa Rica). *Tecnología en Marcha*, 40(4), 15-27
- Calvo, G. (2019). Nuevo índice para valorar la calidad de aguas superficiales en Costa Rica. *Tecnología en Marcha*, 32(4), 104-115.
- Castillo, B. (2022). Informe de resultados obtenidos en análisis de agua del río Agualote en Grecia, Alajuela durante el año 2022. Trabajo Comunal Universitario, TC-388, Educación para el Manejo de Residuos Sólidos. Sede de Occidente, UCR.
- Chislock, M., Doster, E., Zitomer, R. A., & Wilson, A. E. (2013). Eutrophication: causes, consequences, and controls in aquatic ecosystems. *Nature Education Knowledge*, 4(4), 10.
- Comité Sectorial Regional Agropecuario Región Central Occidental. Plan Regional de Acciones Climáticas y Gestión de Riesgos 2018-2022. Recuperado el 11/4/2024 de: http://www.infoagro.go.cr/Publicaciones/Documents/PACGR_2018-2022_RegionCentralOccidental.pdf
- Cortés, J. (2014). Compilación y análisis de las investigaciones científicas sobre temas marinos y atmosféricos en el Pacífico Norte de Costa Rica. *Biología Tropical*, 62 (151).
- De Jonge, V; Elliott, M & Orive, E. (2002). Causes, historical development, effects and future challenges of a common environmental problem: eutrophication. *Hydrobiologia*, 475 (1-19).
- Fuentes, M. (2018). Evaluación fisicoquímica de la calidad del agua superficial en el centro poblado de Sacsamarca, región Ayacucho, Perú (Doctoral dissertation, Pontificia Universidad Católica del Perú (Perú)).

- Gastezzi-Arias, P; Rincón, J. (2023). Composición de los macroinvertebrados según la calidad del agua en turberas de altura , Costa Rica. *Biología Tropical* (71).
- Gilbert, M., & Wendell. P. (2008). *Introducción a la ingeniería medio ambiental*. Madrid, España, PEARSON EDUCACIÓN. S.A.
- Gómez, G. P., García, V. A., Rodríguez, J. A. R., Herrera, F., & Gutiérrez, R. S. (2021). Calidad fisicoquímica y microbiológica del agua superficial del río Grande de Tárcoles, Costa Rica: un enfoque ecológico. *UNED Research Journal*, 13(1), e3148-e3148.
- Mena, R., Vásquez, B., Gómez, C., Fonseca, S., Rodríguez, R., & Sánchez, G. (2018). Ecosystemic assessment of surface water quality in the Virilla river: towards sanitation processes in Costa Rica. *Water*, 10(7), 845.
- MINAE. (2007). Decreto N° 33903-MINAE-S: Reglamento para la Evaluación y Clasificación de la Calidad de Cuerpo de Aguas Superficiales. *Diario Oficial La Gaceta*. <https://n9.cl/qwoz> San José, Costa Rica, *Diario La Gaceta*.
- MINAE. (2021). PLAN ESTRATÉGICO INSTITUCIONAL DE CONTROL Y PROTECCIÓN DEL RECURSO HÍDRICO. Recuperado el 11/4/2024 de: https://chrome-extension://efaidnbmninnibpcapjcgiclfndmkaj/https://da.go.cr/wp-content/uploads/2021/07/Plan-estrategico-institucional-Control-y-Proteccion%CC%81n_julio-2021.pdf
- Monge, M (2020). Estudio Hidrogeológico para la Subcuenca del Río Grande, Valle Central Occidental, Costa Rica. Servicio Nacional de Aguas Subterráneas, Riego y Avenamiento (SENARA) Dirección de Investigación y Gestión Hídrica (DIGH).
- Mora-Alvarado, D. (2001). Evolución y expectativas de la contaminación en la cuenca del río Grande de Tárcoles. *Tecnología en Marcha* 3 (14), 76.
- Morales-Ramírez, A; Acuña-González, J; Lizano, O; Alfaro, E & Gómez, E. (2015). Rasgos Oceanográficos en el Golfo Dulce, Pacífico de Costa Rica: una revisión para la toma de decisiones en conservación marina. *Biología Tropical*, (63), 131-160.
- Municipalidad de Grecia. (2009). PLAN CANTONAL DE DESARROLLO HUMANO LOCAL DE GRECIA. Recuperado el 11/4/24 de: <https://www.grecia.go.cr/articulo/395/plan-regulador>
- Municipalidad de Grecia. (2019). Campaña de Limpieza del Río Agualote. Recuperado el 11/4/24 de: <https://www.grecia.go.cr/micrositio/articulo/261/campana-de-limpieza-rio-agualote>
- Municipalidad de Grecia. (2021). Plan regulador y urbano del cantón de Grecia. Recuperado el 11/4/24 de: <https://www.grecia.go.cr/articulo/395/plan-regulador>
- Ramírez, C. A. S. (2021). *Calidad del agua: evaluación y diagnóstico*. Ediciones de la U.
- Ríos, R., & González, G. (2021). Cambio climático y planificación urbana: desafíos y oportunidades para la Evaluación Ambiental Estratégica. *Revista de Derecho Ambiental*, 2(16), 73-107.
- Ruiz, P., & Suárez, C. (2017). Evaluación integral de “Puente de Piedra”, Grecia, Costa Rica y su potencial turístico. *Revista Geológica de América Central*, 57.

Sánchez , G., Alfaro Ch., Ledezma Z., Hernando E., Mora A., & Pérez S. (2021). Aspectos do contexto socioambiental que inciden en la contaminación hídrica en un área urbana. *Uniciencia*, 35(2), 308-327.

Vargas, A., & Fernández, J. (2002). Contribución a la hidrogeología volcánica de Grecia, valle central occidental de Costa Rica. *Revista Geológica de América Central*, 27.