

Carga contaminante de la ciudad de Santiago de los Caballeros (República Dominicana) al Río Yaque del Norte. Un estudio longitudinal.

Vladimir A. Rodríguez Núñez, Ms.C¹, and Francisco Orgaz-Agüera, Ph.D²

^{1,2}Universidad Tecnológica de Santiago, UTESA, República Dominicana, sostenibilidad@utesa.edu, franorgaz@utesa.edu

Resumen— La contaminación de los ríos ha generado una gran preocupación por parte de los gobiernos y la población, debido a la aceleración de la urbanización y el rápido desarrollo de la economía. El objetivo de esta investigación es analizar la carga contaminante de la ciudad de Santiago de los Caballeros (República Dominicana) al río Yaque del Norte. Esta ciudad es la segunda más importante de la República Dominicana por número de habitantes, y el río Yaque del Norte es el río más largo del país. Se recolectaron un total de 288 muestras de agua superficial correspondientes a dos sitios de monitoreo en el río Yaque del Norte, uno a la entrada de la ciudad y otro a la salida. Las muestras fueron recogidas, mensualmente, desde enero de 2010 hasta diciembre de 2021. Los resultados muestran que la ciudad de Santiago de los Caballeros incrementa el grado de contaminación

del río Yaque del Norte, evidenciándose en los parámetros de oxígeno disuelto, turbidez, color, conductividad, sólidos totales disueltos, dureza, alcalinidad, sólidos suspendidos, demanda química de oxígeno, demanda bioquímica de oxígeno, nitratos, nitritos, amonio, nitrógeno total, fósforo total, ortofosfatos, cloruros, coliformes fecales y coliformes totales. Se determina que es necesario adoptar un método económico y factible para llevar a cabo un análisis de las causas de la contaminación del agua superficial, con el propósito de formular políticas y planes de control de la contaminación del agua oportunamente, en respuesta a la rápida expansión urbana de la ciudad.

Palabras clave-- contaminación, río, calidad del agua, ciudades.

Digital Object Identifier: (only for full papers, inserted by LACCEI).

ISSN, ISBN: (to be inserted by LACCEI).

DO NOT REMOVE

Polluting load from the city of Santiago de los Caballeros (Dominican Republic) to the Yaque del Norte River. A longitudinal study.

Vladimir A. Rodríguez Núñez, Ms.C¹, and Francisco Orgaz-Agüera, Ph.D²

^{1,2}Universidad Tecnológica de Santiago, UTESA, República Dominicana, sostenibilidad@utesa.edu, franorgaz@utesa.edu

Abstract– The pollution of rivers has generated great concern on the part of governments and the population, due to the acceleration of urbanization and the rapid development of the economy. The objective of this research is to analyze the pollutant load from the city of Santiago de los Caballeros (Dominican Republic) to the Yaque del Norte river. This city is the second largest in the Dominican Republic by number of inhabitants, and the Yaque del Norte River is the longest river in the country. A total of 288 surface water samples were collected corresponding to two monitoring sites in the Yaque del Norte river, one at the entrance of the city and another at the exit. The samples were collected, monthly, from January 2010 to December 2021. The results show

that the city of Santiago de los Caballeros increases the degree of contamination of the Yaque del Norte river, evidenced in the parameters of dissolved oxygen, turbidity, color, conductivity, total dissolved solids, hardness, alkalinity, suspended solids, chemical demand for oxygen, biochemical oxygen demand, nitrates, nitrites, ammonium, total nitrogen, total phosphorous, orthophosphates, chlorides, fecal coliforms, and total coliforms. It is determined that it is necessary to adopt an economic and feasible method to carry out an analysis of the causes of surface water pollution, with the purpose of formulating water pollution control policies and plans in a timely manner, in response to the rapid expansion city urban.

Keywords– pollution, river, water quality, cities.

I. INTRODUCCIÓN

Como fuente principal de agua dulce en la superficie de la Tierra, los ríos juegan un papel insustituible en la supervivencia humana y el desarrollo social [1]. En los últimos años, la contaminación de los ríos ha generado una gran preocupación por parte de los gobiernos y la población, debido a la aceleración de la urbanización y el rápido desarrollo de la economía [2]. Los estudios han demostrado que el deterioro de la calidad del agua de los ríos se debe, principalmente, a la descarga excesiva de aguas residuales de la agricultura, la industria y los hogares [3]. Así, cuando un río está contaminado, afecta significativamente a la calidad de los cuerpos de agua circundantes. En este sentido, el objetivo de esta investigación es analizar la carga contaminante de la ciudad de Santiago de los Caballeros (República Dominicana) al río Yaque del Norte. Esta ciudad es la segunda más importante de la República Dominicana por número de habitantes, y el río Yaque del Norte es el río más largo del país. La problemática de esta investigación se debe a que, la cuenca del río Yaque del Norte, la más grande de República Dominicana (14.6% del territorio nacional), provee agua a comunidades con una población cercana a los 1.8 millones de habitantes [4]. Además, este río desemboca en un área coralina [5], que son ecosistemas que desempeñan un papel vital en la seguridad alimentaria y de subsistencia de decenas de millones de personas, pero que se encuentran amenazados a nivel mundial por los impactos humanos [6] y las actividades industriales y residuales de las ciudades [7].

II. REVISIÓN DE LA LITERATURA

La falta de saneamiento adecuado para los seres humanos es un problema que afecta, al menos, a 4,500 millones de personas [8]. Incluso en países con una alta cobertura de instalaciones de saneamiento modernas, el diseño deficiente y la falta de compromiso para mantener la infraestructura conducen a una contaminación masiva, a través de la descarga en aguas superficiales y subterráneas [7]. Con desechos humanos tan generalizados e intensos que ingresan a las vías fluviales, no sorprende que los modelos globales de contaminación por aguas residuales predigan una contaminación generalizada de las aguas superficiales [9]. La contaminación de las aguas superficiales es una amenaza global para la salud pública [10] y para la vida silvestre y los hábitats naturales [11]. Las plantas y la vida silvestre que viven en o alrededor del agua contaminada, a menudo acumulan toxinas y patógenos [8]. También, por ejemplo, la presencia de metales pesados en los peces depredadores se correlaciona positivamente con el aumento de la contaminación por aguas residuales en esas aguas [12]. Así, se ha demostrado que los patógenos que se encuentran en la contaminación de las aguas causan enfermedades generalizadas en los seres humanos [13] y provoca la viruela blanca en los corales del Caribe [14]. Los ríos son fundamentales para la salud y la supervivencia humanas, ya que proporcionan agua potable y proteínas esenciales. Dado que los seres humanos viven cerca de estos ecosistemas y, a menudo, los utilizan para la eliminación de desechos, los sistemas de agua dulce son especialmente susceptibles a la contaminación [8]. En países con poblaciones humanas en aumento, esta presión es particularmente intensa. La contaminación por aguas residuales en los ecosistemas de agua

dulce aumenta la concentración y transmisión de patógenos humanos, que causan unas 829,000 muertes por año [15]. La contaminación por aguas residuales también aumenta la incidencia de toxicidad por metales pesados tanto en humanos como en peces [16]. Los arrecifes de coral brindan servicios a los humanos, protegiendo las costas de la erosión, proporcionando alimentos y empleo a 500 millones de personas, y mejorando la biodiversidad [17]. Los arrecifes de coral están amenazados por la contaminación de aguas [18], debido a que el exceso de nutrientes provoca el crecimiento excesivo de algas o zonas muertas donde los bajos niveles de oxígeno matan a los corales [19]. La contaminación de las aguas también exponen los arrecifes a metales pesados y disruptores endocrinos [18]. En áreas de agua dulce muy contaminadas, la descarga de aguas residuales conduce a niveles de oxígeno peligrosamente bajos, ya que las bacterias descomponen cargas cada vez mayores de materia orgánica y agotan el oxígeno disponible, generando más enfermedades para la flora y fauna terrestre y marina [20, 21, 22]. Los sistemas terrestres, la vida silvestre y los seres humanos, también, se ven afectados por la contaminación de las aguas de los ríos. El uso de aguas para uso urbano y para regar tierras de cultivo es una práctica común en todo el mundo [23] pero estos efluentes generalmente no se tratan, y la probable presencia de metales pesados, productos farmacéuticos, disruptores endocrinos o hidrocarburos, entre otros, representa una amenaza potencial tanto para los humanos como para la vida silvestre [24]. Un estudio que recogía muestras en los suelos, la hierba, los vegetales y la leche provenientes de un área cercana a un río contaminado de India, mostraron altas concentraciones de Zinc, Níquel y Plomo [23]. Una revisión exhaustiva de Manzetti y van der Spoel [25] ha resaltado la reducción de la biodiversidad, debido a la desembocadura de lodos de aguas residuales tratados o no tratados en la superficie de los cuerpos hídricos. Esto ocurre porque el lodo suele estar altamente contaminado con sustancias químicas tóxicas, que también son absorbidas por la flora y fauna, lo que conduce a la muerte prematura de plantas y animales. Los productos químicos disruptores endocrinos, comunes en las aguas residuales domésticas, también, presentan problemas adicionales de contaminación [8].

III. METODOLOGÍA

Área de estudio

La cuenca hidrográfica Yaque del Norte tiene una extensión de 7,053 km² e incide en 40 municipios dentro de seis provincias de las regiones Cibao Norte y Cibao Noroeste. El río principal es el Yaque del Norte, con una longitud de 296 km, naciendo en la Rusilla, municipio de Jarabacoa, y desembocando en la provincia de Montecristi. En esta cuenca se encuentran varios sistemas de presas, integrados por Tavera-Bao, Monción, Chacuey y Maguaca, con una capacidad de almacenamiento de 820.7 millones de m³ de agua. Este río genera hasta 488 gigawats de electricidad por año, y riega unas 70,003 hectáreas de cultivos de arroz, banano y otros cultivos, beneficiando a unos 14,800 productores. En la figura 1 se muestra la localización y recorrido del río Yaque del Norte [4].

Figura 1. Localización y recorrido del río Yaque del Norte.



El área estudiada es el paso del río por Santiago de los Caballeros (longitud $070^{\circ}41' 49.31''$ y latitud: $N19^{\circ}27' 6.12''$), la segunda mayor ciudad de la República Dominicana, capital de la provincia Santiago y principal centro metropolitano de la región norte. El municipio posee una superficie de 474.1 km^2 , con una densidad de población de $1,458 \text{ hab/km}^2$ y una población de $691,262$ personas [26]. La ciudad se caracteriza por un clima donde los veranos son largos, cálidos y nublados, y los inviernos son cortos, cómodos, y generalmente despejados. A lo largo del año, la temperatura oscila entre los 19°C a 33°C y rara vez baja a menos de 17°C o sube a más de 34°C , siendo un clima de transición entre seco y húmedo, con una precipitación anual de 600 a 900 mm [27]. Santiago de los Caballeros es uno de los principales centros económicos, financieros, políticos, sociales y culturales de la República Dominicana. Además es un importante centro industrial de ron, textiles, cigarrillos, tabaco, fábricas de calzado, artículos de cuero y de muebles. La ciudad cuenta con un sistema de redes de alcantarillado sanitario y de plantas para el tratamiento de aguas residuales con una cobertura deficiente.

Muestreo y análisis

Se recolectaron un total de 288 muestras de agua superficial correspondientes a dos sitios de monitoreo en el río Yaque del Norte. El primer punto fue en las coordenadas $E31^{\circ}98' 76.53''$ y $N21^{\circ}47' 53.70''$, a la entrada de Santiago de los Caballeros, y el segundo punto estaba ubicado en las coordenadas $E31^{\circ}83' 15.81''$ y $N21^{\circ}52' 57.77''$, a la salida de la ciudad. Las muestras fueron recogidas desde enero de 2010 hasta diciembre de 2021, una por mes en cada punto. Por tanto, se han realizado muestreos, ininterrumpidos, mensualmente durante 12 años. Cada muestra fue tomada por el equipo técnico de campo de la Corporación del Acueducto y Alcantarillado de Santiago (CORAASAN). Las muestras se tomaron a una distancia de 2.00 m de la orilla sumergiendo los frascos a una profundidad de

entre 0.20 m a 0.30 m por debajo de la superficie del agua, utilizando un muestreador con varilla telescópica y se recolectaron en frascos de plástico de 1000 ml (parámetros fisicoquímicos), de cristal color ámbar 1000 ml (parámetros orgánicos), y plástico 125 ml , (parámetros bacteriológicos). Posteriormente, las muestras se enviaron al Laboratorio de Aguas Residuales de la CORAASAN, conservándose a una temperatura de entre 8 a 9 grados Celsius, hasta realizar los análisis.

Los parámetros de calidad del agua seleccionados para la investigación en este estudio se muestran en la tabla 1, incluyendo la unidad de medida, símbolo y método analítico.

Tabla 1. Parámetros, símbolo, unidad y método analítico

Parámetro	Símbolo	Unidad	Método analítico
Oxígeno Disuelto	OD	% sat.	SM-4500-O-G
Temperatura		$^{\circ}\text{C}$	SM-2550-B
Potencial de Hidrógeno	pH	-	SM-4500-H+.B
Turbidez		NTU	SM-2130-B
Color		U. Pt-Co	SM-2120-C
Conductividad		mmhos/cm	SM-2510-B
Sólidos totales disueltos	TDS	mg/l	SM-2540-C
Dureza		mg/l CaCO_3	SM-2340-C
Alcalinidad		mg/l CaCO_3	SM-2320-B
Sólidos Suspendidos	SS	mg/l	SM-2540-B
Demanda Química de Oxígeno	DQO	mg/l	SM-5220-B
Demanda Bioquímica de Oxígeno	DBO ₅	mg/l	SM-5210-B
Nitratos	NO_3^-	mg/l	HACH-8039
Nitritos	NO_2^-	mg/l	HACH-8507
Amonio	NH_4^+	mg/l	HACH-8038
Nitrógeno Total	N	mg/l	HACH-10072
Fósforo Total	P	mg/l	HACH-10210
Ortofosfatos	P- PO_4	mg/l	HACH-8048
Cloruros	Cl^-	mg/l	HACH-8113
Coliformes totales		NMP/100ml	SM-9221-B
Coliformes fecales (NMP/100ml)		NMP/100ml	SM-9221-E

Análisis estadístico

Los datos fueron tabulados en Microsoft Excel 2022 y analizados con el programa estadísticos SPSS.

IV. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

En la tabla 2 se muestra el valor promedio de cada parámetro a la entrada de la ciudad por año. En color verde se presentan los valores máximos reflejados en los promedios de cada año para el periodo muestreado; y en color amarillo se evidencian los valores mínimos.

Tabla 2. Valores promedio a la entrada de la ciudad

Parámetro	Entrada a ciudad (2010-2021)											
	2010	2011	2012	2013	2014	2015	2016	2017	2018	2019	2020	2021
Oxígeno Disuelto (% sat.)	93.5	85.5	92.4	91.7	87.3	96	97.4	87.7	91.7	85.1	87.9	84.5
Temperatura (°C)	24.8	24.3	24.8	24.1	25.3	25.4	25.1	24.4	19.5	21.7	22.7	21.4
pH	7.2	6.9	7.4	7.4	7.2	7.3	7.0	7.2	7.8	7.8	7.7	7.1
Turbidez (NTU)	8.8	13.2	11.1	9.4	8.6	8.1	9.3	20.1	9.5	9	7	5.1
Color (U. Pt-Co)	66	112	115	81.4	60.2	61.8	87.2	117	92.8	91.7	75.6	55.6
Conductividad (mmhos/cm)	217	132	223	215	224	162	153	184	123	192	144	150.7
Sólidos totales disueltos (mg/l)	103.5	63.9	108.6	105.0	108.25	77	76.5	87.7	59.1	92.1	68.8	77.6
Dureza (mg/l)	115	190	118	73.9	113	121	152	323	124	127	213	93
Alcalinidad (mg/l)	47.6	217	106	103	116	134	215	422	440	225	84.7	66.2
Sólidos Suspendedos (mg/l)	49.5	62.9	20.6	20.5	63.7	12.7	16	15.1	12	30.2	23.5	13.1
Demanda Química de Oxígeno (mg/l)	14.1	9.8	10.4	7.9	12.5	15.8	10.2	12	11.5	10.8	10.1	10.5
Demanda Bioquímica de Oxígeno (mg/l)	4.6	4.6	3.0	2.3	2.4	3.8	3	3	3.8	2.6	2.2	2.1
Nitratos (mg/l)	2.1	1.8	2.4	1.1	1	1	0.9	0.9	0.8	0.9	1.2	1.4
Nitritos (mg/l)	0.1	0.1	0.05	0.03	0.01	0.04	0.03	0.03	0.03	0.05	0.01	0.01
Amonio (mg/l)	1	1.1	0.4	0.5	0.6	1	1.14	1.14	0.5	0.4	0.2	0.4
Nitrógeno Total (mg/l)	2	3	3	1.4	1.4	1.4	1	1.2	1.2	1.9	0.9	0.9
Fósforo Total (mg/l)	0.2	1	1.3	0.6	0.2	0.2	0.6	0.2	0.1	0.4	0.2	0.2
Ortofosfatos (mg/l)	0.3	0.6	0.6	0.4	0.3	0.2	0.3	0.1	0.2	0.3	0.2	0.1
Cloruros (mg/l)	4.1	3.9	5.5	3	4	5.1	4.4	4	4.2	4.7	5.6	2.6
Coliformes totales (NMP/100ml)	54,786.3	21,249.17	21,496.67	11,761.691.6	271,545.4	59,219.1	75,293.6	5,255	7,557.5	16,652.5	5,440.8	1,987.6
Coliformes fecales (NMP/100ml)	35,246.3	8,482.5	7,422	11,705.145.8	98,618.1	14,845.0	50,725.4	1,317.6	2,130.6	3,039.2	2,777	487.6

Los parámetros evaluados en el río Yaque del Norte a la entrada de la ciudad de Santiago de los Caballeros evidencian que los niveles de oxígeno disuelto en el agua, importantes para la supervivencia de los peces y de otros organismos de la vida acuática, se han mantenido por encima del 80 porcentaje de saturación, destacándose que el año 2021 presenta la concentración más baja de 84.53%, en contraste con la mayor registrada en el año 2018 de 97.44%.

La temperatura que controla muchos de los procesos biológicos y químicos que se desarrollan en el agua, al analizar su comportamiento observamos que los valores fluctúan entre un mínimo de 19.59 °C y un máximo de 25.40 °C, dicho rango no constituyen niveles que puede dañar a los peces, la vida acuática, o generar cambios indeseados en las comunidades biológicas. A modo de referencia mencionamos que el Estado Libre Asociado de

Massachusetts, Estados Unidos de América, estableció estándares de protección de la calidad del agua para la pesquería, en aguas superficiales Clase B, con un límite máximo de temperatura de 28.3 °C (83 °F).

El intervalo de las concentraciones de pH está comprendido entre 6.95 a 7.83. Los valores registrados se consideran normales para un agua natural y no suponen ningún problema para la vida acuática. La norma dominicana ambiental de calidad de agua en cuerpos hídricos superficiales establece valores límites en el rango de 6.5 a 8.5.

Una de las maneras de determinar la claridad del agua al medir cuánto material está suspendido en ella, es la turbidez. A lo largo del período analizado, los valores ha oscilado entre 5.18 NTU y 20.17 NTU, estas concentraciones ocurren de forma natural en el río Yaque del Norte. El color es importante para conocer el nivel de presencia de iones metálicos naturales, materia orgánica y contaminantes domésticos e industriales. La norma dominicana ambiental de calidad de agua en cuerpos hídricos superficiales establece valores máximos aceptables de 15 (U. Pt-Co) en la clasificación del cuerpo hídrico Clase A (aguas destinadas al abastecimiento público de agua potable sin necesidad de tratamiento previo, excepto simple desinfección), de 50 (U. Pt-Co) en la categoría del cuerpo hídrico Clase B (aguas destinadas al abastecimiento público de agua potabilizable con tratamiento), y de 200 (U. Pt-Co) para la clasificación Clase C (aguas utilizadas para navegación, enfriamiento, y otros usos que no impliquen contacto directo). Al examinar el comportamiento del color observamos que los niveles fluctúan entre un mínimo de 55.67 (U. Pt-Co) y un máximo de 117.00 (U. Pt-Co), dichos valores solo son adecuado para la categoría Clase C.

La conductividad eléctrica del agua proporciona una evaluación de la concentración total de iones disueltos en el agua, y es una propiedad importante que se toma frecuentemente como un indicador del grado de mineralización. En el caso de los valores de conductividad eléctrica del agua en el río Yaque del Norte a la entrada de la ciudad, se observa con excepción del año 2014 (2,203.09 mmhos/cm), niveles adecuados para la producción de agua potable y de suministro para riego agrícola, con valores que fluctuaron entre un mínimo promedio de 123.97 mmhos/cm (2018) y máximo promedio de 223.50 mmhos/cm (2012).

Los sólidos totales disueltos (TDS) comprenden las sales inorgánicas y pequeñas cantidades de materia orgánica que se disuelven en el agua. Los niveles evidenciados en el río a la entrada de la urbe oscilan entre un valor mínimo de 59.17 mg/l a un máximo de 108.62 mg/l, excluyendo las concentraciones registrada en el 2014 que promediaron los 1,082.55 mg/l y que guarda relación con el aumento observado de la temperatura (25.37 °C) y la disminución de los niveles de oxígeno disuelto (87.31% sat), ya que el agua se caliente más rápidamente porque las partículas en suspensión absorben más calor y agotan el oxígeno; además de la vinculación con el aumento observado en la conductividad en dicho año (2,203.09 mmhos/cm). La norma dominicana ambiental de calidad de agua en cuerpos hídricos

superficiales establece un valor máximo aceptable de 1,000 mg/l de sólidos totales disueltos para las categorías de cuerpo hídrico, Clase A y B.

La cantidad de iones de compuestos naturales de calcio y magnesio presentes en el agua (dureza), se encuentran en el rango de 73.92 mg/l a 323.67 mg/l. Utilizando la escala Merck para determinar el grado de dureza del agua a la entrada de la ciudad, observamos fluctuaciones entre una clasificación de agua muy blanda (0-79 mg CaCO₃/l) y de agua semidura (150-329 mg CaCO₃/l). En relación a los niveles en el agua para neutralizar los ácidos, alcalinidad, estos oscilan entre un mínimo de 47.69 mg/l y un máximo de 440.00 mg/l. El comportamiento de los sólidos suspendidos oscila entre un valor mínimo de 12.00 mg/l y un máximo de 63.70 mg/l. La importancia del monitoreo de los sólidos en suspensión es que estos pueden dar lugar al desarrollo de depósitos de fango, además de que disminuyen el paso de la luz a través del agua, evitando así la actividad fotosintética importante para la producción de oxígeno.

La Demanda Biológica de Oxígeno (DBO₅) y la Demanda Química de Oxígeno (DQO) del agua, establecen el consumo de oxígeno requerido para oxidar la materia orgánica. Los niveles de la DQO en el río Yaque del Norte a la entrada de la urbe fluctúan entre 7.92 mg/l y 15.85 mg/l, y los correspondiente a la DBO₅ oscilan entre un mínimo de 2.17 mg/l y un máximo de 4.63 mg/l. Las concentraciones evidenciadas no cumplen con el valor máximo aceptable de 2.00 mg/l para la DBO₅ establecido en la norma dominicana ambiental de calidad de agua en cuerpos hídricos superficiales de Clase A.

El conocimiento del contenido de nitrógeno en sus variadas formas resulta de gran interés para la protección de los diferentes usos del agua y junto al fósforo para el control de crecimiento excesivo de plantas acuáticas en el río Yaque del Norte. En la entrada de la ciudad las concentraciones de nitrógeno total fluctúan en un intervalo relativamente amplio con un valor mínimo de 0.97 mg/l a un máximo de 3.01 mg/l. Los niveles de nitrógeno en sus formas de amonio (NH₄) entre los 0.27 mg/l a 1.14 mg/l, de nitritos (NO₂⁻) en el rango de 0.01 mg/l a 0.11 mg/l, y de nitratos (NO₃⁻) entre los 0.85 mg/l a 2.40 mg/l. La norma dominicana ambiental de calidad de agua en cuerpos hídricos superficiales establece un valor máximo aceptable de 10.00 mg/l en relación al parámetro de control NO₃-N + NO₂-N para las categorías clase A y B, los valores observados en el río oscilan entre los 0.88 mg/l a 2.44 mg/l cumpliendo con el límite normativo.

Las concentraciones del fósforo total superan los límites máximos permitidos en la norma dominicana ambiental de calidad de agua en cuerpos hídricos superficiales. Los valores en el río Yaque del Norte a la entrada de Santiago de los Caballeros oscilan en el intervalo de 0.18 mg/l a 1.31 mg/l, niveles atribuidos a las actividades agrícolas, y que han provocado que las concentraciones de fósforo sean contaminantes y no las adecuadas para comportarse como un nutriente imprescindible para la vida de los organismos acuáticos. Por su parte, los ortofosfatos (P-PO₄) fluctúan en el rango de 0.15 mg/l a 0.67 mg/l; la norma dominicana ambiental de calidad de agua en

cuerpos hídricos superficiales no establece un objetivo numérico para este parámetro. El cloruro (Cl⁻) oscilan entre 2.68 mg/l a 5.65 mg/l, niveles que se encuentran de forma natural en el río y cumplen con el límite máximo permitido de 250 mg/l, establecido en la norma dominicana ambiental de calidad de agua en cuerpos hídricos superficiales de Clase A.

Las concentraciones de coliformes supera los valores máximos correspondientes a la norma dominicana ambiental de calidad de agua en cuerpos hídricos superficiales de Clase A, que establece límites de 1,000 NMP/100ml para los coliformes totales, y de 400 NMP/100ml para los coliformes fecales. En la entrada de la ciudad se observan concentraciones de coliformes totales que fluctúan en un amplio intervalo que vas desde 1,987.60 NMP/100ml hasta 11,761,691.67 NMP/100ml. Similar comportamiento se evidencia con los coliformes fecales que oscilan en el rango de 487.60 NMP/100ml a 11,705,145.83 NMP/100ml. Lo cierto es que desde el punto de vista bacteriológico, el riesgo de beber o usar directamente el agua del río Yaque del Norte es extremadamente alto, constituyéndose en una fuente de infección para la salud humana.

En la tabla 3 y 4 se muestran el valor promedio de cada parámetro a la salida de la ciudad por año.

Tabla 3. Valores promedio a la salida de la ciudad

Parámetro	Salida ciudad (2010-2015)					
	2010	2011	2012	2013	2014	2015
Oxígeno Disuelto (% sat.)	90.2	84.8	89.5	88.8	77.4	78.0
Temperatura (°C)	25.7	25.0	24.3	24.4	25.5	25.6
pH	7.5	7.14	7.3	7.4	7.4	7.3
Turbidez (NTU)	159.2	67.8	72.0	82.1	100.5	50.2
Color (U. Pt-Co)	528.5	379.3	518	488	544.9	287.3
Conductividad (mmhos/cm)	498.4	356.8	333.9	523.5	4,807.9	786.3
Sólidos totales disueltos (mg/l)	236.7	171.2	163.4	259.2	2,424.3	393
Dureza (mg/l)	201.1	363	205.4	139	266	287.9
Alcalinidad (mg/l)	144.6	776.4	111.1	137	220.7	179.7
Sólidos Suspendidos (mg/l)	203.1	113.	71.2	206.3	133.1	43.2
Demanda Química de Oxígeno (mg/l)	39.6	19.3	30.5	24.3	26.9	19.9
Demanda Bioquímica de Oxígeno (mg/l)	13.08	7.3	11.3	9.8	6.8	6.5
Nitratos (mg/l)	12.6	5.5	9.6	5.7	5.2	5.2
Nitritos (mg/l)	3.92	0.19	0.19	0.18	0.58	0.61
Amonio (mg/l)	2	2.5	1.4	2.5	2.4	3.8
Nitrógeno Total (mg/l)	4.71	5.62	3.93	2.71	4.90	5.58
Fósforo Total (mg/l)	3.55	2.13	1.49	1.16	1.94	2.65
Ortofosfatos (mg/l)	1.58	1.30	1.07	0.88	1.67	2.63
Cloruros (mg/l)	27.0	39.5	21.9	37.6	49.9	57.4
Coliformes totales (NMP/100ml)	1,103.4 35.8	5,767.50	12,672.58 3.3	26,950.08 3.3	6,272.727. 2	4,486.666. 6
Coliformes fecales (NMP/100ml)	696,840. 9	5,155,500	12,381.75 0	13,521.50 0	3,918.181. 8	4,260,000

Tabla 4. Valores promedio a la salida de la ciudad

Parámetro	Salida ciudad (2015-2021)						
	2015	2016	2017	2018	2019	2020	2021
Oxígeno Disuelto (% sat.)	78.0	90.9	84.3	72.2	73.6	72.0	72.1
Temperatura (°C)	25.6	25	24.3	20.7	22.2	23.0	22.6
pH	7.3	7.3	7.2	7.6	7.5	7.3	7.1
Turbidez (NTU)	50.2	93.3	34.4	12.8	46.6	78.5	37.8
Color (U. Pt-Co)	287.3	637	214	131.7	346.2	454.4	262.8
Conductividad (mmhos/cm)	786.3	502.1	281.4	519.4	523	507	544.2
Sólidos totales disueltos (mg/l)	393	241	133.3	255.00	253.4	245.3	270.1
Dureza (mg/l)	287.9	278.1	227	365.3	233	239.3	232.9
Alcalinidad (mg/l)	179.7	284.8	572.4	940	275.3	142.2	138.7
Sólidos Suspendedos (mg/l)	43.2	91.4	58.7	19.6	80.5	154.5	35.4
Demanda Química de Oxígeno (mg/l)	19.9	20.6	16.6	18.8	30.6	26.4	14.5
Demanda Bioquímica de Oxígeno (mg/l)	6.5	7.7	5.4	6.5	10.9	10	5.3
Nitratos (mg/l)	5.2	5.1	1.5	2.3	3.6	2.2	3
Nitritos (mg/l)	0.61	0.20	0.13	0.55	0.11	0.02	0.05
Amonio (mg/l)	3.8	3	1.7	5.9	2.5	2.1	2.5
Nitrógeno Total (mg/l)	5.58	3.96	1.84	7.60	5.10	3.92	2.94
Fósforo Total (mg/l)	2.65	1.71	0.46	2.84	1.53	2.46	1.17
Ortofosfatos (mg/l)	2.63	1.26	0.84	2.44	1.30	1.15	1.03
Cloruros (mg/l)	57.4	36.1	14.2	28.2	57.3	18.5	10.3
Coliformes totales (NMP/100ml)	4,486,666.6	4,829,454.5	1,609,333.3	3,861,250	658,333.3	1,113,333.3	508,143
Coliformes fecales (NMP/100ml)	4,260,000	4,411,909	625,333.3	3,015,000	216,833.3	864,500	278,543

Los valores obtenidos sobre la calidad del agua del río Yaque del Norte tras su paso por el área urbana de Santiago de los Caballeros manifiestan que las concentraciones del porcentaje de saturación de oxígeno disuelto disminuyen considerablemente después del paso del río por la ciudad en comparación con los valores encontrados en la entrada. A partir del año 2018 los niveles registrados se han mantenido constantemente por debajo del 80%, lo que significa que según la norma dominicana ambiental de calidad de aguas superficiales, la clasificación del cuerpo hídrico, tomando en consideración el parámetro de estudio, cambia de Clase A (aguas destinadas al abastecimiento público de agua potable sin necesidad de tratamiento previo, excepto simple desinfección) en la entrada de la ciudad, a Clase B (aguas destinadas al abastecimiento público de agua potabilizable con tratamiento) tras el paso del río por la urbe. Las bajas concentraciones de oxígeno disuelto es un indicador de la presencia de altas cargas orgánicas y/o nutrientes en el agua.

Al analizar el comportamiento de la temperatura del agua en el río, observamos que los valores a la salida de Santiago de los Caballeros oscilan en el rango de 20.71 °C a 25.75 °C, valores muy similares a los encontrados a la entrada de la ciudad que fluctúan entre un mínimo de 19.59 °C y un máximo de 25.40 °C. La norma dominicana ambiental de calidad de agua en cuerpos hídricos superficiales y en aguas costeras no establece un

objetivo numérico para la temperatura, sin embargo establece un límite sobre el gradiente de temperatura de +/- 3 °C.

Las variaciones del potencial de hidrógeno entre el valor verificado en el agua a la entrada de la ciudad, no superan las 0.4 unidades con relación al encontrado a la salida de la urbe en igual fecha de muestreo. El intervalo de las concentraciones de pH en el agua tras el paso del río por la ciudad está comprendido entre 7.14 a 7.69. La norma dominicana ambiental de calidad de agua en cuerpos hídricos superficiales establece valores límites de potencial de hidrógeno en el rango de 6.5 a 8.5.

Los objetivos de calidad de agua para la turbidez requieren que las aguas de los ríos no tengan cambios en la turbidez que puedan causar molestia o afectar negativamente las aplicaciones útiles del agua. Los niveles registrados de turbidez a la salida de la urbe, con respecto a los valores de entrada, muestran un aumento muy significativo. Las concentraciones de turbidez después del paso del río por la ciudad fluctúan en el rango de 12.89 NTU a 159.25 NTU. Las causas del aumento de la turbidez puede ser provocadas por la: escorrentía urbana, erosión del suelo, descarga de desechos, bancos del río y arroyos en erosión, crecimiento excesivo de algas, y dragado. Estos materiales suspendidos pueden obstruir las branquias de los peces, afecta el desarrollo de los huevos, larvas y macroinvertebrados bentónicos.

El color es un parámetro organoléptico que está relacionado con las sustancias disueltas y las partículas en suspensión que contiene el agua. El río Yaque del Norte luego de su paso por la ciudad presenta un incremento drástico en los niveles de color, oscilando en el intervalo entre 131.78 U. Pt-Co y 637.00 U. Pt-Co. Con excepción del año 2018 (131.78 U. Pt-Co) los niveles presentados son superiores al valor máximo aceptable para la clasificación Clase C (200 U. Pt-Co), establecido en la norma dominicana ambiental de calidad de agua en cuerpos hídricos superficiales.

La conductividad varía en función de la fuente de agua, por lo tanto, puede utilizarse también como un indicador de la presencia de aguas residuales. La norma dominicana ambiental de calidad de agua en cuerpos hídricos superficiales no establece objetivos numéricos para la conductividad, aunque si para el total de sólidos disueltos. En el río Yaque del Norte los niveles de conductividad aumentan tras el paso del río por la ciudad alcanzando concentraciones en el intervalo entre 281.42 y 786.36 mmhos/cm, exceptuado el año 2014 (4,807.91mmhos/cm). Los valores registrados de los sólidos totales disueltos a la salida de la ciudad, excluyendo el año 2014 (2,424.36 mg/l), se encuentran en el rango de 133.38 mg/l a 393.09 mg/l, estas concentraciones cumple con el valor máximo aceptable en la norma que establece un límite de 1,000 mg/l de sólidos disueltos, tanto para las categorías de cuerpo hídrico, Clase A y B.

Las concentraciones de dureza del agua se incrementa después del paso del río por el área urbana, oscilando en el intervalo entre 139.07 mg CaCO₃/l y 365.33 mg CaCO₃/l. Acorde a los datos y utilizando la escala Merck para determinar

el grado de la dureza, el agua fluctúa entre una clasificación de agua blanda (80-149 mg CaCO₃/l) y de agua dura (330-549 mg CaCO₃/l).

En los niveles de alcalinidad se observa un mínimo de 111.17 mg/l y un máximo de 940.00 mg/l de carbonato de calcio (CaCO₃) a la salida de la ciudad. Las aguas del río Yaque del Norte contribuyen con el desarrollo agrícola de la región a través de los canales de riego; aunque es complejo determinar cuándo un nivel de alcalinidad del agua es muy alto para los cultivos agrícolas, ya que son varios los factores que afectan el potencial de hidrógeno del sustrato, es importante recordar que cuando se utilizan aguas con altos valores de alcalinidad se produce un elevado pH del sustrato, y este a su vez, hace poco disponibles a ciertos nutrientes, aun cuando estos se encuentran presentes en el sustrato. En ese sentido, aunque la norma dominicana ambiental de calidad de agua en cuerpos hídricos superficiales no establece objetivos numéricos para dicho parámetro, es relevante continuar con su monitoreo.

Dentro de la composición de los sólidos suspendidos podemos encontrar arena, limo y materia orgánica fina. Las concentraciones de los sólidos suspendidos en el agua del Yaque del Norte a su paso por la urbe se incrementan rápidamente, alcanzando incluso niveles máximos de 206.32 mg/l, afectando la calidad del agua para los diferentes usos que recibe en la cuenca. Este incremento en la carga de sólidos suspendidos es otro indicador que refleja que la cuenca requiere mayores controles y prioridades para su ordenamiento y manejo.

La degradación de la materia orgánica es uno de los procesos que causa la disminución del oxígeno disuelto presente en el agua. Elevadas concentraciones en el agua de la Demanda Biológica de Oxígeno (DBO₅) y la Demanda Química de Oxígeno (DQO), ocasionan un alto consumo de oxígeno disuelto que incluso puede ocasionar la muerte de los peces. La norma dominicana ambiental de calidad de agua en cuerpos hídricos superficiales, establece concentraciones máximas de la DBO₅ de 2.00 mg/l para la Clase A, y de 5.00 mg/l para la Clase B. Las concentraciones de la DBO₅ y la DQO del río tras su paso por Santiago de los Caballeros aumentan notablemente, oscilando la Demanda Química de Oxígeno entre 14.58 mg/l y 39.67 mg/l, y los niveles de la Demanda Biológica de Oxígeno entre un mínimo de 5.33 mg/l y un máximo de 13.08 mg/l. Los valores de la DBO₅ observados exceden los límites máximos permitidos en la norma para las categorías de aguas superficiales Clase A y B. Estas concentraciones de la Demanda Biológica de Oxígeno solo son adecuadas para la categoría Clase C, aguas utilizadas para navegación, enfriamiento, y otros usos que no impliquen contacto directo.

Los niveles de nitrógeno en sus variadas formas se elevan producto del paso del río por la ciudad, alcanzando concentraciones para el nitrógeno total que fluctúan en un intervalo muy amplio con un valor mínimo de 1.84 mg/l a un máximo de 7.60 mg/l. Los niveles de nitrógeno en su forma de amonio (NH₄) oscilan entre 1.47 mg/l y 5.90 mg/l; de nitritos (NO₂⁻) en el rango de 0.02 mg/l a 3.92 mg/l; y de nitratos (NO₃⁻) entre 1.53 mg/l y 12.64 mg/l. Este incremento implica una

alteración perjudicial, debido a que una proporción importante del oxígeno disuelto del agua será consumido en los procesos de oxidación del nitrógeno, en adición al de la materia orgánica. Además de que junto al fósforo son responsables del crecimiento desmesurado de organismos fotosintéticos que se evidencia en algunos tramos del Yaque del Norte.

Los valores de fósforo total en el agua a la entrada de la ciudad superan los límites máximos permitidos en la norma dominicana ambiental de calidad de agua en cuerpos hídricos superficiales. De manera alarmante, tras el paso del río por la urbe los niveles prosiguen incrementándose, oscilan en el rango de 0.46 mg/l a 3.55 mg/l; semejante situación ocurre con los ortofosfatos (P-PO₄) que fluctúan en el intervalo entre 0.84 mg/l y 2.63 mg/l. Las concentraciones observadas afectan de forma notable la calidad del agua del río Yaque del Norte, debido a que favorecen una secuencia de fenómenos relacionados con la eutrofización.

En relación al cloruro (Cl⁻) los niveles se amplían fluctuando en un intervalo entre 10.34 mg/l y 57.48 mg/l, este aumento de la concentración de cloruro puede deberse a la contaminación por vertido de aguas residuales. Confrontando los valores observados con los establecidos en la norma dominicana ambiental de calidad de agua en cuerpos hídricos superficiales, estos cumplen con el límite máximo permitido de 250 mg/l para la Clase A.

Las concentraciones de coliformes continúan incrementándose alcanzando valores impresionantes que oscilan en un amplio intervalo que va desde los 508,143.00 NMP/100ml hasta los 26,950,083.33 NMP/100ml. para los coliformes totales, y de 278,543.00 NMP/100ml a 13,521,500.00 NMP/100ml. para los coliformes fecales.

En la tabla 5 se muestran los valores promedio, máximo y mínimo de cada parámetro a la entrada y salida de la ciudad de Santiago de los Caballeros.

Tabla 5. Valores promedio, máximo y mínimo de entrada y salida

Parámetro	Entrada a ciudad (2010-2021)			Salida de ciudad (2010-2021)		
	Promedio	Máximo	Mínimo	Promedio	Máximo	Mínimo
Oxígeno Disuelto (% sat.)	90.10	97.44	84.53	81.20	90.95	72.04
Temperatura (°C)	23.68	25.40	19.59	24.07	25.75	20.71
pH	7.37	7.83	6.95	7.39	7.69	7.14
Turbidez (NTU)	9.99	20.17	5.18	69.65	159.25	12.89
Color (U. Pt-Co)	84.77	117.00	55.67	399.39	637.00	131.78
Conductividad (mmhos/cm)	341.99	2,203.09	123.97	848.69	4,807.91	281.42
Sólidos totales disueltos (mg/l)	166.90	1,082.55	59.17	420.53	2,424.36	133.38
Dureza (mg/l)	147.32	323.67	73.92	253.20	365.33	139.07
Alcalinidad (mg/l)	181.58	440	47.69	326.95	940.00	111.17
Sólidos Suspendidos	28.34	63.70	12.00	100.88	206.32	19.67

(mg/l)						
Demanda Química de Oxígeno (mg/l)	11.34	15.85	7.92	24.04	39.67	14.58
Demanda Bioquímica de Oxígeno (mg/l)	3.16	4.63	2.17	8.42	13.08	5.33
Nitratos (mg/l)	1.33	2.40	0.85	5.17	12.64	1.53
Nitritos (mg/l)	0.04	0.11	0.01	0.56	3.92	0.02
Amonio (mg/l)	0.72	1.14	0.27	2.72	5.90	1.47
Nitrógeno Total (mg/l)	1.65	3.01	0.97	4.40	7.60	1.84
Fósforo Total (mg/l)	0.50	1.31	0.18	1.92	3.55	0.46
Ortofosfatos (mg/l)	0.35	0.67	0.15	1.43	2.63	0.84
Cloruros (mg/l)	4.32	5.65	2.68	33.22	57.48	10.34
Coliformes totales (NMP/100ml)	1,025,181.29	11,761,691.67	1,987.60	5,819,403.67	26,950,083.33	508,143.00
Coliformes fecales (NMP/100ml)	994,186.46	11,705,145.83	487.60	4,112,157.62	13,521,500.00	278,543.00

Las alteraciones observadas en la calidad del agua del río Yaque del Norte tras su paso por la ciudad de Santiago de los Caballeros, impactan negativamente sus potencialidades naturales. El inocultable deterioro ambiental se evidencia en casi la totalidad de los parámetros analizados.

En la disminución del oxígeno disuelto que a la entrada de la urbe se encuentra en un promedio para el periodo analizado de 90.10% sat y a la salida en 81.20% sat. Importante destacar que a partir del año 2018 los niveles registrados tras el paso del río por la urbe se han mantenido constantemente por debajo del 80 (% sat.), valores inferiores a los requerido por la norma dominicana para la Clase A de aguas superficiales.

La variación de los niveles de temperatura y del pH son prácticamente mínimos, registrándose valores promedio de temperatura en la entrada de 23.68°C y en la salida 24.07°C, y del potencial de hidrogeno de 7.37 entrada y de 7.39 tras el paso del río por la ciudad. La norma dominicana ambiental de calidad de agua en cuerpos hídricos superficiales establece valores para el pH en el rango de 6.5 a 8.5.

Las concentraciones de la turbidez y de los sólidos suspendidos aumentan significativamente afectando las aplicaciones útiles del agua, observándose valores promedios en el río a la entrada y salida de la ciudad de 9.99 NTU y 69.65 NTU para la turbidez; y de 28.34 mg/l y 100.88 mg/l de sólidos suspendidos.

El valor promedio de color a la entrada de la ciudad 84.77 U. Pt-Co, posiciona al cuerpo hídrico en la categoría Clase C (200 U. Pt-Co), según la norma dominicana para este parámetro. Sin embargo tras el paso del río por Santiago de los Caballeros los niveles de color muestran un incremento drástico alcanzando un valor promedio de 399.39 U. Pt-Co, nivel muy superior a los máximos aceptables para cualquiera de las categorías de aguas superficiales.

Los cambios en las concentraciones de conductividad y sólidos totales disueltos son relativamente importantes, registrándose valores promedio de conductividad en la entrada de 341.99 mmhos/cm y en la salida de 848.69 mmhos/cm; y de sólidos totales disueltos de 166.90 mg/l entrada y de 420.53 mg/l tras el paso del río por la ciudad. Las concentraciones de los sólidos totales disueltos observados en el río a la entrada y salida cumplen con el límite máximo de 1,000 mg/l establecido en la norma dominicana, tanto para la categoría de cuerpo hídrico Clase A, como para la Clase B de aguas superficiales.

La dureza del agua a la entrada de la ciudad promedia un valor de 147.32 mg CaCO₃/l; utilizando la escala Merck para determinar el grado de la dureza, el agua posee una clasificación de agua blanda (80-149 mg CaCO₃/l). En cambio a la salida, la concentración de dureza aumentan a un valor promedio de 253.20 mg CaCO₃/l, obteniendo una clasificación de agua semidura (150-329 mg CaCO₃/l). Comportamiento similar sucede con los niveles de alcalinidad, observándose en la entrada del río a Santiago de los Caballeros un valor de 181.58 mg/l de carbonato de calcio y a la salida de 326.95 mg CaCO₃/l.

El consumo de oxígeno disuelto provocado por la degradación de la materia orgánica y cuantificada mediante la Demanda Biológica de Oxígeno (DBO₅) y la Demanda Química de Oxígeno (DQO) en la entrada del río a la ciudad presenta valores promedios de 3.16 mg/l de DBO₅ y 11.34 mg/l de DQO. El valor de la Demanda Biológica de Oxígeno observado supera el límite de 2.00 mg/l para la Clase A, sin embargo cumple con el máximo de 5.00 mg/l establecido para la Clase B en la norma dominicana ambiental de calidad de agua en cuerpos hídricos superficiales. Luego del paso del río por el área urbana los niveles de la Demanda Biológica de Oxígeno y la Demanda Química de Oxígeno se incrementan de manera importante alcanzando valores promedios de 8.42 mg/l de DBO₅ y 24.04 mg/l de DQO. Esta concentración de la Demanda Biológica de Oxígeno solo es adecuada para la categoría Clase C, aguas utilizadas para navegación, enfriamiento, y otros usos que no impliquen contacto directo.

Los niveles de nitrógeno y fósforo en sus variadas formas aumentan significativamente tras el paso del río por la ciudad, registrándose valores promedios de nitrógeno total en la entrada de 1.65 mg/l y a la salida de 4.40 mg/l. Las concentraciones de nitrógeno en su forma de amonio (NH₄) muestran valores promedios de entrada y salida de 0.72 mg/l y 2.72 mg/l; de nitritos (NO₂⁻) se observan 0.04 mg/l y 0.56 mg/l; y de nitratos (NO₃⁻) de 1.33 mg/l y 5.17 mg/l. Los valores de fósforo total en la entrada y la salida de la ciudad superan los límites máximos permitidos en la norma dominicana ambiental de calidad de agua en cuerpos hídricos superficiales, registrándose valores promedios de 0.50 mg/l y 1.92 mg/l. El comportamiento de los ortofosfatos (P-PO₄) muestra niveles de entrada y salida promedio de 0.35 mg/l y 1.43 mg/l. Este enriquecimiento de nutrientes implican una alteración perjudicial, el cual promueve un aumento en la densidad del fitoplancton, generando una pérdida de la calidad del agua y de condiciones anóxicas.

En relación al cloruro (Cl-) los niveles de entrada y salida cumplen con el límite máximo permitido de 250 mg/l establecido en la norma para la Clase A de cuerpo hídrico superficial, no obstante se evidencia un incremento importante tras el paso del río por la ciudad registrándose valores de 4.32 mg/l en la entrada y de 33.22 mg/l de salida.

Las concentraciones de coliformes observadas son alarmantes, superan excesivamente los valores máximos establecidos en la norma dominicana ambiental de calidad de agua en cuerpos hídricos superficiales, alcanzando niveles de entrada y salida de 1,025,181.29 NMP/100ml y 5,819,403.67 NMP/100ml para los coliformes totales, y de 994,186.46 NMP/100ml y 4,112,157.62 NMP/100ml para los coliformes fecales. Los valores observados son un indicador de contaminación fecal reciente en el agua, y constituyen un riesgo importante por la posibilidad de estar presentes organismos peligrosos para la salud de las personas.

V. CONCLUSIONES

La presente investigación ha mostrado que la ciudad de Santiago de los Caballeros incrementa el grado de contaminación del río Yaque del Norte. Se ha evidenciado el acrecentamiento de la contaminación en los parámetros de oxígeno disuelto, turbidez, color, conductividad, sólidos totales disueltos, dureza, alcalinidad, sólidos suspendidos, demanda química de oxígeno, demanda bioquímica de oxígeno, nitratos, nitritos, amonio, nitrógeno total, fósforo total, ortofosfatos, cloruros, coliformes fecales y coliformes totales. El incremento de la carga contaminante provoca, sobre todo, dos impactos negativos en las comunidades que reciben el agua tras su paso por la ciudad de Santiago de los Caballeros. El primero de ellos, el impacto que genera a las comunidades agrícolas de la región noroeste de la República Dominicana, puesto que esta zona es la principal área productora del país (arroz y banano, sobre todo). El agua es utilizada para regar estos cultivos y, en otros estudios, se ha comprobado que el agua contaminada que reciben las plantas puede generar problemas de salud, tanto a la planta [28, 29] como a los humanos o animales cuando consumen dicho alimento [30, 31]. La segunda problemática se deriva de que el río Yaque del Norte desemboca en aguas próximas a zonas coralinas, generando esto perturbaciones ambientales que provocan, incluso, la disminución de los corales [32]. Por tanto, los resultados de esta investigación han mostrado que producto de la contaminación antropogénica, la calidad del agua del río Yaque del Norte a su paso por la ciudad de Santiago de los Caballeros está empeorando, generando alteraciones y problemáticas para los cultivos, asentamientos humanos y sistemas costeros-marinos de la República Dominicana. A partir de este estudio, el gobierno nacional y el municipal, con la ayuda de investigadores, empresarios, comunidad regional y comunidad local, deben analizar el grado de influencia urbana y la sección clave del río, considerando las probables causas vinculadas y algunas medidas sugeridas, que deberían contribuir al desarrollo de políticas de control de la contaminación urbana más acordes con las situaciones reales de la ciudad de Santiago de los Caballeros. Actuar ahora es esencial, debido a que con el rápido crecimiento empresarial y poblacional de esta ciudad se puede generar mayores dificultades para el control de la contaminación,

convirtiéndose en un desafío para los actores locales y regionales. Por lo tanto, es necesario adoptar un método económico y factible para llevar a cabo un análisis de las causas de la contaminación del agua superficial, con el propósito de formular políticas y planes de control de la contaminación del agua oportunamente, en respuesta a la rápida expansión urbana de la ciudad.

BIBLIOGRAFÍA

- [1] Chen K, Liu QM, Peng WH, Liu Y, Wang ZT. Source apportionment of river water pollution in a typical agricultural city of Anhui Province, eastern China using multivariate statistical techniques with APCS-MLR. *Water Science and Engineering* [Internet]. 2022 [consultado el 17 de enero de 2023]. Disponible en: <https://doi.org/10.1016/j.wse.2022.12.007>
- [2] Reitz A, Hemric E, Hall KK. Evaluation of a multivariate analysis modeling approach identifying sources and patterns of nonpoint fecal pollution in a mixed use watershed. *Journal of Environmental Management* [Internet]. 2021 [consultado el 21 de enero de 2023];277:111413. Disponible en: <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2020.111413>
- [3] Postigo C, Ginebreda A, Barbieri MV, Barceló D, Martín-Alonso J, de la Cal A, Boleda MR, Otero N, Carrey R, Solà V, Queralt E, Isla E, Casanovas A, Frances G, López de Alda M. Investigative monitoring of pesticide and nitrogen pollution sources in a complex multi-stressed catchment: The lower Llobregat River basin case study (Barcelona, Spain). *Science of The Total Environment* [Internet]. 2021 [consultado el 17 de enero de 2023];755:142377. Disponible en: <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.142377>
- [4] Fondo Agua Yaque del Norte [Internet]. Cuenca Yaque del Norte - Fondo Agua Yaque del Norte; 2022 [consultado el 19 de enero de 2023]. Disponible en: <https://fondoaguayaque.org/cuenca-yaque-del-norte/>.
- [5] Zapata Lantigua ZA, Casilla Maríñez MA, & Rodríguez Bellón MA. Caracterización preliminar del estado actual de los arrecifes de la costa nordeste de la provincia Montecristi (Parque Nacional Submarino Montecristi): documento informe técnico, junio-julio 2012. Proyecto Piloto de Manejo y Conservación de la Pesquería y Biodiversidad Arrecifal – Parque Nacional Montecristi, República Dominicana 2012. Santo Domingo: Ministerio de Medio Ambiente y Recursos Naturales; 2012.
- [6] Cramer KL, Bernard ML, Bernat I, Gutierrez L, Murphy EL, Surrey KC, & Gerber LR. The Present and Future Status of Ecosystem Services for Coral Reefs. *Imperiled: the Encyclopedia of Conservation*; 2022. 46-54.
- [7] Gates, B., & Gates, M. *Water, sanitation & hygiene strategy overview*. Global development program, Seattle. 2012.
- [8] Wear SL, Acuña V, McDonald R, & Font C. Sewage pollution, declining ecosystem health, and cross-sector collaboration. *Biological Conservation*. 2021; 255, 109010.
- [9] Acuña V, Bregoli F, Font C, Barceló D, Corominas L, Ginebreda A, Petrovic M, Rodríguez-Roda I, Sabater S, Marcé R. Management actions to mitigate the occurrence of pharmaceuticals in river networks in a global change context. *Environment International* [Internet]. 2020; 143:105993. Disponible en: <https://doi.org/10.1016/j.envint.2020.105993>
- [10] Hasan MK, Shahriar A, Jim KU. Water pollution in Bangladesh and its impact on public health. *Heliyon* [Internet]. 2019 [consultado el 2 de febrero de 2023];5(8):e02145. Disponible en: <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2019.e02145>
- [11] Li P, Wang X, Su M, Zou X, Duan L, & Zhang H. Characteristics of plastic pollution in the environment: a review. *Bulletin of environmental contamination and toxicology*. 2021; 107(4), 577-584.
- [12] Saha N, Mollah MZ, Alam MF, Safiur Rahman M. Seasonal investigation of heavy metals in marine fishes captured from the Bay of Bengal and the implications for human health risk assessment. *Food Control* [Internet]. 2016 [consultado el 21 de enero de 2023];70:110-8. Disponible en: <https://doi.org/10.1016/j.foodcont.2016.05.040>.
- [13] Walker CLF, Rudan I, Liu L, Nair H, Theodoratou E, Bhutta ZA., O'Brien KL, Campell H, Black RE. Global burden of childhood pneumonia and diarrhoea. *The Lancet*. 2013; 381(9875), 1405-1416.
- [14] Sutherland KP, Shaban S, Joyner JL, Porter JW, Lipp EK. Human Pathogen Shown to Cause Disease in the Threatened Eklhorn Coral *Acropora palmata*. *PLoS ONE* [Internet]. 2011 [consultado el 19 de enero de 2023];6(8):e23468. Disponible en: <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0023468>
- [15] Prüss-Ustün A, Wolf J, Bartram J, Clasen T, Cumming O, Freeman MC, Gordon B, Hunter PR, Medlicott K, Johnston R. Burden of disease from

- inadequate water, sanitation and hygiene for selected adverse health outcomes: An updated analysis with a focus on low- and middle-income countries. *International Journal of Hygiene and Environmental Health* [Internet]. 2019 [consultado el 24 de enero de 2023];222(5):765-77. Disponible en: <https://doi.org/10.1016/j.ijheh.2019.05.004>
- [16] Alves RI, Sampaio CF, Nadal M, Schuhmacher M, Domingo JL, Segura-Muñoz SI. Metal concentrations in surface water and sediments from Pardo River, Brazil: Human health risks. *Environmental Research* [Internet]. 2014 [consultado el 25 de enero de 2023];133:149-55. Disponible en: <https://doi.org/10.1016/j.envres.2014.05.012>
- [17] Barbier EB, Hacker SD, Kennedy C, Koch EW, Stier AC, Silliman BR. The value of estuarine and coastal ecosystem services. *Ecological Monographs* [Internet]. 2011 [consultado el 25 de enero de 2023];81(2):169-93. Disponible en: <https://doi.org/10.1890/10-1510.1>
- [18] Wear SL, Thurber RV. Sewage pollution: mitigation is key for coral reef stewardship: Sewage pollution and coral reef stewardship. *Ann N Y Acad Sci* [Internet]. 2015;1355(1):15–30. Disponible en: <http://dx.doi.org/10.1111/nyas.12785>
- [19] Altieri AH, Harrison SB, Seemann J, Collin R, Diaz RJ, Knowlton N. Tropical dead zones and mass mortalities on coral reefs. *Proc Natl Acad Sci U S A* [Internet]. 2017;114(14):3660–5. Disponible en: <http://dx.doi.org/10.1073/pnas.1621517114>
- [20] Goksøyr A. Endocrine disruptors in the marine environment: mechanisms of toxicity and their influence on reproductive processes in fish. *J Toxicol Environ Health Part A* [Internet]. 2006;69(1–2):175–84. Disponible en: <http://dx.doi.org/10.1080/15287390500259483>
- [21] Weber P, Behr ER, Knorr CD, Vendruscolo DS, Flores EM, Dressler VL, Baldissarroto B. Metals in the water, sediment, and tissues of two fish species from different trophic levels in a subtropical Brazilian river. *Microchemical Journal* [Internet]. Enero de 2013 [consultado el 3 de febrero de 2023];106:61-6. Disponible en: <https://doi.org/10.1016/j.microc.2012.05.004>
- [22] Lambert MR, Giller GSJ, Barber LB, Fitzgerald KC, Skelly DK. Suburbanization, estrogen contamination, and sex ratio in wild amphibian populations. *Proc Natl Acad Sci U S A* [Internet]. 2015;112(38):11881–6. Disponible en: <http://dx.doi.org/10.1073/pnas.1501065112>
- [23] Sridhara Chary N, Kamala CT, Samuel Suman Raj D. Assessing risk of heavy metals from consuming food grown on sewage irrigated soils and food chain transfer. *Ecotoxicology and Environmental Safety* [Internet]. Marzo de 2008 [consultado el 3 de febrero de 2023];69(3):513-24. Disponible en: <https://doi.org/10.1016/j.ecoenv.2007.04.013>
- [24] Singh KP, Mohan D, Sinha S, Dalwani R. Impact assessment of treated/untreated wastewater toxicants discharged by sewage treatment plants on health, agricultural, and environmental quality in the wastewater disposal area. *Chemosphere* [Internet]. Abril de 2004 [consultado el 3 de febrero de 2023];55(2):227-55. Disponible en: <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2003.10.050>
- [25] Manzetti S, van der Spoel D. Impact of sludge deposition on biodiversity. *Ecotoxicology* [Internet]. 2015;24(9):1799–814. Disponible en: <http://dx.doi.org/10.1007/s10646-015-1530-9>
- [26] Demografía. Tu municipio en cifras: Santiago. Oficina Nacional de Estadística. ONE. 2020;
- [27] MMAyRN. *Provincia Santiago de los Caballeros*. Ministerio de Medio Ambiente y Recursos Naturales. Santo Domingo. 2009.
- [28] Deviller G, Lundy L, Fatta-Kassinos D. Recommendations to derive quality standards for chemical pollutants in reclaimed water intended for reuse in agricultural irrigation. *Chemosphere* [Internet]. Febrero de 2020 [consultado el 3 de febrero de 2023];240:124911. Disponible en: <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2019.124911>
- [29] Bijay-Singh, Craswell E. Fertilizers and nitrate pollution of surface and ground water: an increasingly pervasive global problem. *SN Applied Sciences* [Internet]. 31 de marzo de 2021 [consultado el 3 de febrero de 2023];3(4). Disponible en: <https://doi.org/10.1007/s42452-021-04521-8>
- [30] Wang P, Chen H, Kopitke PM, Zhao F-J. Cadmium contamination in agricultural soils of China and the impact on food safety. *Environ Pollut* [Internet]. 2019;249:1038–48. Disponible en: <http://dx.doi.org/10.1016/j.envpol.2019.03.063>
- [31] Qin J, Niu A, Liu Y, Lin C. Arsenic in leafy vegetable plants grown on mine water-contaminated soils: Uptake, human health risk and remedial effects of biochar. *Journal of Hazardous Materials* [Internet]. Enero de 2021 [consultado el 3 de febrero de 2023];402:123488. Disponible en: <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2020.123488>
- [32] Okello C, Oduor N, Owato G, Mutiso J, Owuor M, Tuda A. Assessment of land-based pollution problems in Kenyan marine environments to facilitate