

Evaluación longitudinal de la dinámica de la calidad del agua en el Río Santiago*

Longitudinal evaluation of the dynamics of water quality in the Santiago River

*Aida Alejandra Guerrero de León^a, Alberto Daniel Rocha Muñoz^b,
Gualberto Iglesias Gonzalez^c y Valerie Natalia Salazar Zepeda^d*

Resumen / Abstract

Se evaluó la dinámica longitudinal de la calidad del agua en el río Santiago durante diez años (2009-2020). Mediante análisis de parámetros fisicoquímicos y microbiológicos en un punto de muestreo significativo entre los municipios de El Salto y Juanacatlán. Los resultados mostraron que el Índice de Calidad del Agua (ICA) se mantuvo en la categoría de "Pobre", reflejando una grave y persistente contaminación. El ICA se calculó mediante oxígeno disuelto (OD), coliformes fecales (CF), potencial de hidrógeno (pH), demanda bioquímica de oxígeno (DBO5), temperatura del agua (Temp), fósforo total (PT), nitratos (NO₃-), turbidez y sólidos disueltos totales (SDT). Estos parámetros determinaron un ICA consistentemente "Pobre" en los 10 años de seguimiento, una calidad de agua insuficiente para el consumo humano y la conservación de los ecosistemas. Los niveles de OD estuvieron frecuentemente por debajo del mínimo requerido, y los CF superaron consistentemente los límites permisibles, indicando un ambiente anóxico y alta presencia de contaminantes biológicos. Estos hallazgos subrayan la necesidad urgente de implementar intervenciones efectivas para mejorar el tratamiento de aguas residuales y mitigar los impactos negativos en la salud pública y el ecosistema.

Palabras clave: río Santiago, índice de calidad del agua, calidad de agua, dinámica longitudinal, contaminación microbiológica.

* **Agradecimientos.** Proyecto financiado por CONAHCYT-Proyectos Nacionales-PRONCES-AGUA, en la primera etapa del proyecto titulado "Incidencia para la regeneración ecohidrológica y la reapropiación comunitaria de la Cuenca Alta del Río Grande de Santiago. No. 318965 -2021-2024.

a. La Profesora Guerrero de León es Bióloga con grado de Doctora en Ecología y Manejo de Recursos Naturales. Profesora Investigadora adscrita al Departamento de Estudios del Agua y la Energía en el Centro Universitario de Tonalá de la Universidad de Guadalajara. Miembro del Sistema Nacional de Investigadores. Línea de investigación Agua y Medio Ambiente. Correo electrónico: aida.guerrero@academicos.udg.mx (primer autor).

b. El Profesor Rocha Muñoz es Médico con grado de Doctor en Ciencias Médicas y Posdoctorado en Farmacología Clínica. Profesor Investigador adscrito al Departamento de Salud-Enfermedad como Proceso Individual, Centro Universitario de Tonalá de la Universidad de Guadalajara. Miembro del Sistema Nacional de Investigadores. Línea de investigación Enfermedades crónico-degenerativas. Correo electrónico: alberto.rocha@academicos.udg.mx

c. El Profesor Iglesias González es Ingeniero en Nanotecnología. Técnico Académico del Instituto Transdisciplinar de Investigación y Servicios (ITRANS). Centro Universitario de Ciencias Exactas e Ingenierías. Correo electrónico: guaberto2008@gmail.com.

d. Valerie Natalia Salazar Zepeda es estudiante de Doctorado del Departamento de Estudios de la Salud Poblacional. Centro Universitario de Tonalá, Universidad de Guadalajara. Correo electrónico: valerie.salazar@alumnos.udg.mx.

The longitudinal dynamics of water quality in the Santiago River were evaluated over ten years (2009-2020) through the analysis of physicochemical and microbiological parameters at a significant sampling point between the municipalities of El Salto and Juanacatlán. The results showed that the Water Quality Index (WQI) remained in the "Poor" category, reflecting severe and persistent pollution. The WQI was calculated using dissolved oxygen (DO), fecal coliforms (FC), hydrogen potential (pH), biochemical oxygen demand (BOD5), water temperature (Temp), total phosphorus (TP), nitrates (NO₃-), turbidity, and total dissolved solids (TDS). These parameters determined a consistently "Poor" WQI over the 10 years of monitoring, indicating water quality insufficient for human consumption and ecosystem conservation. DO levels were frequently below the required minimum, and FC levels consistently exceeded permissible limits, indicating an anoxic environment and high presence of biological contaminants. These findings underscore the urgent need to implement effective interventions to improve wastewater treatment and mitigate the negative impacts on public health and the ecosystem.

Keywords: Santiago River, water quality index, water quality, longitudinal dynamics, microbiological contamination.

INTRODUCCIÓN

La calidad del agua de los ríos es un indicador crucial del estado de los ecosistemas acuáticos y de la salud pública. La contaminación del agua puede llevar a la proliferación de enfermedades, la pérdida de fuentes de agua potable y la disminución de la productividad agrícola y pesquera, afectando significativamente la salud humana y de los ecosistemas (Thorslund et al., 2021; Gervasio et al., 2022). Los ríos actúan como conductos de transporte para nutrientes y contaminantes, influenciando directamente la biodiversidad acuática y la calidad del agua utilizada para consumo humano, agricultura y recreación.

En México, la situación de calidad del agua de sus ríos es alarmante. La contaminación por metales pesados, residuos industriales y aguas residuales urbanas es prevalente. El manejo de aguas residuales es deficiente en muchas áreas, con un alto porcentaje de aguas residuales descargadas sin tratamiento adecuado, lo que agrava la calidad del agua en los cuerpos receptores (Gutiérrez et al., 2022). La gestión inadecuada de aguas residuales contribuye significativamente a la contaminación del agua, ya que introduce patógenos, nutrientes excesivos y químicos tóxicos en los ríos.

El río Santiago, que fluye desde el lago de Chapala hasta el océano Pacífico, es uno de los ríos más importantes de México, recorriendo 562 kilómetros y atravesando importantes centros industriales y urbanos. Históricamente, la problemática ambiental del río Santiago ha sido significativa debido a la descarga continua de aguas residuales sin tratamiento adecuado. Durante las últimas décadas, la expansión industrial y urbana ha resultado en altos niveles de contaminación, afectando gravemente la salud pública en comunidades como El Salto y Juanacatlán, donde se han reportado altas incidencias de cáncer y enfermedades renales (Peniche et al., 2022; Teran-Velasquez et al., 2022).

Evaluar la dinámica longitudinal de la calidad del agua en el río Santiago es crucial para comprender las variaciones temporales y espaciales de los contaminantes y diseñar estrategias efectivas de gestión y mitigación. La "dinámica longitudinal" se refiere al estudio de cómo cambian los

niveles de contaminantes y otros parámetros de calidad del agua a lo largo del curso del río y en diferentes momentos (Holbach et al., 2022). Este enfoque permite identificar patrones y fuentes de contaminación, facilitando el desarrollo de políticas de gestión ambiental más efectivas.

Los estudios longitudinales de la calidad del agua utilizan tecnologías avanzadas de monitoreo, como sensores en tiempo real y análisis multivariado, para proporcionar una visión detallada de los procesos biogeoquímicos que afectan la calidad del agua.

El monitoreo y la modelización de la calidad del agua son herramientas esenciales para evaluar el estado ecológico y químico de los cuerpos de agua. La Directiva Marco del Agua en Europa establece que todos los cuerpos de agua deben alcanzar un buen estado ecológico y químico (Fang et al., 2023). En este contexto, el uso de tecnologías de monitoreo en tiempo real y el análisis de datos espaciales y temporales permiten obtener una visión detallada de la calidad del agua y de los factores que la afectan (Holbach et al., 2022; Fang et al., 2023).

El Índice de Calidad del Agua (ICA), desarrollado por la Fundación Nacional de Saneamiento (NSF), es una herramienta internacionalmente validada que mide parámetros como la demanda bioquímica de oxígeno (DBO), la concentración de oxígeno disuelto, el pH, la temperatura, y la presencia de nutrientes y metales pesados (Syeed et al., 2023; Chidiac et al., 2023). Este índice proporciona información crucial sobre el estado general de los cuerpos de agua, facilitando la comparación y la identificación de áreas prioritarias para la intervención. Estudios han demostrado que el ICA es efectivo para identificar y monitorear áreas de alta contaminación, aunque también presenta desventajas como la variabilidad en la precisión de los datos debido a las diferencias en métodos de muestreo y análisis (Syeed et al., 2023; Chidiac et al., 2023).

Evaluar la dinámica longitudinal de la calidad del agua en el río Santiago es esencial debido a los riesgos significativos para la salud pública. Los seres humanos pueden estar expuestos a agentes biológicos infecciosos y productos químicos tóxicos a través del agua de consumo o por exposición directa. Patógenos como bacterias, virus y parásitos pueden causar enfermedades gastrointestinales, mientras que la exposición a metales pesados y compuestos químicos puede llevar a enfermedades crónicas y cáncer. La comprensión detallada de los patrones de contaminación y los procesos biogeoquímicos permitirá diseñar estrategias de mitigación que protejan la salud humana y mejoren la calidad del agua. Desde el enfoque ecosistémico el monitoreo y análisis de la calidad del agua en el tiempo nos pueden dar cuenta del nivel de resiliencia del río Santiago, entendiendo la resiliencia es definida por el Grupo Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático (IPCC, por su sigla inglesa) como: “Capacidad de los sistemas sociales, económicos y ambientales de afrontar un fenómeno, tendencia o perturbación peligroso respondiendo o reorganizándose de modo que mantengan su función esencial, su identidad y su estructura, y conserven al mismo tiempo la capacidad de adaptación, aprendizaje y transformación”. En este sentido es importante conocer la capacidad que tendrá los ecosistemas de seguir abasteciendo de agua para las generaciones futuras y el compromiso de las presentes en el cumplimiento en los Objetivos del Desarrollo Sostenible (ODS 2015-2030) sobre agua limpia y saneamiento (IPCC, 2014).

Por tanto, el objetivo de este estudio es evaluar la dinámica longitudinal de la calidad del agua en el río Santiago, utilizando los datos reportados por la Comisión Estatal del Agua sobre el monitoreo continuo del río durante diez años aplicando un análisis multivariado para identificar patrones

de contaminación y sus posibles fuentes. Este análisis proporcionará una comprensión detallada de los procesos que afectan la calidad del agua y ofrecerá información crítica para el desarrollo de políticas y estrategias de gestión ambiental más efectivas de la cuenca hídrica del Río Santiago.

MATERIAL Y MÉTODOS

Diseño: Seguimiento de una cohorte retrospectiva.

Caracterización del área de estudio: El punto de muestreo se localiza entre los municipios de Juanacatlán y El Salto, justo antes de la cascada de Juanacatlán, en las coordenadas N 20°30, 43.7 y W 103°10, 27.4 (**Figura 1**). Estos municipios tienen una población actual de 30,855 y 232,852, respectivamente. Esta zona tiene climas semicálidos semihúmedos, con una temperatura media que oscila entre 20°C y 31°C, su precipitación media anual aproximada de 1000 mm. (IIEG de Jalisco, 2021). En este punto, se percibió fuertes olores a contaminación fecal, así como una gran cantidad de espuma en el río, posiblemente a la alta concentración de surfactantes, esta característica son documentadas en la **Figura 2** y **Figura 3**. Estudios previos realizados por la CONAGUA, han reportado descargas de aguas residuales provenientes de múltiples fuentes (procesos industriales y asentamientos humanos). Se estima que en un solo día se arrojan aproximadamente 394.4 t de materia orgánica, 177.2 t de sólidos suspendidos, 31.9 toneladas (t) de grasas y aceites, 56.4 t de nutrientes, 4.9 t de sustancias activas al azul de metileno, 0.29 t de MP y 0.18 t de compuestos orgánicos (CONAGUA, 2018). Se seleccionó la población de El Salto y Juanacatlán por ser considerarse zona de emergencia ambiental, señalado por diversas autoridad en particular por la Recomendación No. 5/2022 de la Comisión Estatal de Derechos Humanos de Jalisco (CEDH), donde señala que esta región debe ser Área de Intervención Prioritaria en materia de salud.

Obtención de datos: Para realizar los cálculos del ICA, los datos se obtuvieron de los monitoreos mensuales generados en las estaciones de monitoreo de la Comisión Estatal de Agua, Jalisco (CEAJALISCO, <https://www.ceajalisco.gob.mx/>). El punto evaluado fue el correspondiente al Salto-Río Santiago (RS-04), obtenido desde el año 2009 al 2020.

Determinación del Índice de Calidad del Agua (ICA): La calidad el agua se definió con el índice de calidad del agua de la Fundación Nacional de Sanidad de los Estados Unidos de América (ICA-NSF) (Brown et al., 1970). El ICA-NSF se compone de nueve parámetros: saturación de oxígeno disuelto (OD), coliformes fecales (CF), potencial de hidrógeno (pH), demanda bioquímica de oxígeno en 5 días (DBO₅), temperatura del agua (T°), fósforo total (PT), nitratos (NO₃-), turbidez (Turbiedad) y sólidos disueltos totales (SDT). Los nueve parámetros fueron analizados según los métodos APHA 1998 y EPA, 1971 descritos en Geypens et al. 1995 y Murthy 1988).

Obtenido el valor del parámetro evaluado, este se utilizó para determinar el valor de calidad a través de las curvas Q (Imagen).

Los cálculos de ICA-NSF se realizaron de acuerdo con Canter (1998) y Abbasi y Abbasi (2012), mediante la aplicación de la fórmula:

$$ICA = \sum_{I=1}^9 w_i q_i$$

Dónde:

q_i es la calificación del valor de calidad de cada parámetro;

w_i es el peso de importancia.

En **tabla 1**, el estado de la calidad del agua en este estudio se agrupó en cinco categorías con colores que definen sus efectos a la salud pública, siendo: Excelente (Azul: 100 a 80), Bueno (Verde: 79 a 60), Moderada (Amarillo: 59 a 40), Pobre (Naranja: 39 a 20) y Mala (Rojo: 19 a 0).

Análisis estadístico: Se describieron las variables cuantitativas a través de medidas de tendencia central, como media y mediana, posterior se determinaron medidas de dispersión, como desviación estándar y rangos, para posteriormente analizar su normalidad, a través del análisis de curtosis y asimetría, las variables cualitativas fueron expresadas en número y porcentaje. Se realizaron gráficas temporales de los parámetros de interés. Comparaciones de variables cuantitativas realizadas mediante prueba de T de student y ANOVA de un factor, se obtuvieron intervalos de confianza del 95%, y la comparación de variables cualitativas por prueba J_i^2 . Para analizar la tendencia de evolución entre variables cuantitativas realizadas mediante correlación de Pearson. Análisis realizado con paquete estadístico SPSS v25. Se tomó un valor de $p \geq 0.05$ como significativo.

RESULTADOS

Los resultados de la calidad del agua monitoreados muestran un análisis el análisis descriptivo de los parámetros evaluados, separados por año de estudio. Donde podemos encontrar que la mayoría de ellos están fuera de los rangos establecidos y se comportan de manera anormal (**tabla 2**). Algunos de los parámetros están fuera de norma NOM-001-SEMARNAT-2021 y la Ley Federal de Derechos de Agua 2021, establecen criterios de calidad de agua para determinar cuáles están fuera de norma. El Oxígeno disuelto (OD), está en la mayoría de los parámetros fuera de norma, significa que el ambiente es anóxico principalmente. El comportamiento bacteriano es significativamente alto para el parámetro de Coliformes Fecales (CF), esto significa que se en todos los años el parámetro está fuera de norma porque el límite permisible es de 1000 NMP/100ml, este comportamiento en el tiempo es alarmante. El pH si tiene un comportamiento normal, además está dentro del cumplimiento normativo, significa que las descargas de agua que recibe no modifican el potencial de hidrógeno, esta condición puede permitir el desarrollo de la vida acuática. La Demanda Bioquímica de Oxígeno (DBO5) es un parámetro significativo porque tiene que ver con la materia orgánica que son descompuestas por microorganismos, se consume gran cantidad de oxígeno disuelto en el agua, poniendo en riesgo a otros organismos acuáticos que también dependen de este oxígeno para su supervivencia. Por tanto, el aumento de la presencia bacteriana, también impacta en el indicador de DBO5. La temperatura alta aumenta el desove de huevos de peces y aumenta la toxicidad por tanto cualquier descarga con temperatura alta es importante que se regule para la conservación de la biodiversidad, en este caso no se identificaron cambios significativos. El nitrógeno presente en el sistema con un sistema anaerobio genera metano, nitrógeno amoniacal, un efluente rico en nitrógeno amoniacal y SDT provocando susceptibilidad para ser oxidado y puede

comportarse como un reactor anaerobio, este último parámetro está por encima de lo establecido en la LFDA (500). Los valores del Fósforo Total (FT), nos indican el fósforo biológicamente disponible tiene origen en minerales, detergentes, escorrentías agrícolas (fertilizantes) y otros factores antropogénicos. El fósforo fosfatado total (PT) es un nutriente vegetal que, en altas concentraciones en las aguas superficiales, puede provocar eutrofización (fertilización excesiva y es necesario para las bacterias, pero esto puede ser perjudicial para ríos y lagos. Un aumento de estos nutrientes fomenta el crecimiento que agota el oxígeno disuelto y mata a los peces. Pueden crecer una gran cantidad de algas y algunas con toxinas como las cianobacterias (Maters et al 2008) . **(tabla 3)**.

En la **tabla 4**, analizamos el ICA obtenido por año, descrito y comparado contra el primer año de evaluación y obtuvimos que ningún año había sido diferente, esto es que en ninguno de ellos había mejorado en comparación al año de inicio de las observaciones. La tabla 5, establece los tipos de correlaciones entre algunas de las variables, coinciden en el ICA porque existe una correlación negativa fuerte entre variables como DBO, PT y la Turbiedad relacionadas con la calidad del agua, es decir se presenta principalmente abundancia de materia orgánica producto de descargas de agua municipales. El parámetro de Oxígeno Disuelto tiene una correlación positiva con el ICA, y con los demás parámetros. Coliformes Totales no presenta correlaciones debido al comportamiento anormal de los datos.

En la **figura 5**, mostramos el seguimiento del ICA a través del tiempo evaluado, esto desde el 2009 hasta el año 2020, donde podemos observar que, a pesar de los años, no ha habido una mejoría en la calidad. Y si se compara con las clasificaciones propuestas por la Fundación Nacional de Sanidad de los Estados Unidos de América (ICA-NSF), podemos ver la calidad del agua ha sido constante y cayendo en una puntuación de entre 25 a 50, cayendo en la clasificación de “Pobre calidad”.

DISCUSIÓN

Los resultados del estudio muestran que el Índice de Calidad del Agua (ICA) del río Santiago se mantiene en niveles de “Pobre” a “Mala” calidad a lo largo de los diez años de monitoreo. Los parámetros fisicoquímicos y microbiológicos, como el oxígeno disuelto (DO), la demanda bioquímica de oxígeno (DBO5) y los coliformes fecales, se encuentran consistentemente fuera de los rangos aceptables para agua de buena calidad, indicando una persistente contaminación del río. A nivel nacional, la situación del río Santiago es similar a la de otros cuerpos de agua en México que también enfrentan altos niveles de contaminación debido a descargas industriales y urbanas sin tratamiento adecuado (Gutiérrez et al., 2022). Por ejemplo, el río Atoyac en Puebla presenta problemas similares de contaminación por metales pesados y patógenos, afectando gravemente la salud pública local. En comparación con estudios internacionales, los resultados del río Santiago reflejan situaciones observadas en otros ríos contaminados en el mundo. Un estudio en el río Ganges en India encontró que los niveles de contaminantes microbiológicos y químicos están significativamente por encima de los límites seguros, similares a los hallazgos en el río Santiago (Kumar et al., 2021). Asimismo, investigaciones en el río Po en Italia han demostrado que la eutrofización y la presencia de nutrientes excesivos, como el fósforo y los nitratos, son problemas comunes que también se observan en el río Santiago (Gervasio et al., 2022).

Otro trabajo importante reciente en Ecuador se utilizó el ICA- NSF el cual redujo significativamente la gran cantidad de datos fisicoquímicos diversos, de forma simple rápida y objetiva (Robledo-Hernández, 2023).

El monitoreo continuo de la calidad del agua es crucial para entender la evolución temporal y espacial de la contaminación. La consistencia en los datos recolectados durante los diez años de estudio permite identificar patrones y tendencias que son esenciales para diseñar estrategias efectivas de mitigación y gestión ambiental (Fang et al., 2023). Sin un monitoreo regular, sería imposible detectar cambios sutiles en la calidad del agua que pueden tener impactos significativos a largo plazo.

El ICA es una herramienta vital para evaluar la calidad del agua y su impacto en la salud humana. En el caso del río Santiago, los bajos valores del ICA indican una alta exposición de la población a patógenos y químicos tóxicos. Esto se traduce en mayores riesgos de enfermedades gastrointestinales, enfermedades crónicas y cáncer, como se ha observado en las comunidades cercanas al río (Peniche et al., 2022). Evaluar la dinámica longitudinal de la calidad del agua es esencial para comprender las variaciones en los niveles de contaminantes a lo largo del tiempo y el espacio. Este enfoque permite identificar las fuentes de contaminación y evaluar el impacto de las actividades humanas y los cambios ambientales en la calidad del agua (Holbach et al., 2022). Los estudios longitudinales ofrecen una visión detallada de los procesos biogeoquímicos que influyen en la calidad del agua, proporcionando una base sólida para el desarrollo de políticas y estrategias de gestión ambiental.

CONCLUSIONES

El ICA, desarrollado por la Fundación Nacional de Saneamiento (NSF), es un índice validado internacionalmente que mide varios parámetros críticos de la calidad del agua, incluyendo la demanda bioquímica de oxígeno, oxígeno disuelto, pH, temperatura, fósforo total, nitratos, turbidez y sólidos disueltos totales (Syeed et al., 2023; Chidiac et al., 2023). Este índice es ampliamente utilizado para comparar la calidad del agua a nivel nacional e internacional, facilitando la identificación de áreas prioritarias para la intervención. Aunque el ICA es efectivo para monitorear la contaminación, presenta algunas desventajas, como la variabilidad en la precisión de los datos debido a diferencias en métodos de muestreo y análisis (Syeed et al., 2023). Evaluar la calidad del agua en el río Santiago es fundamental debido a los riesgos significativos para la salud pública. La exposición a agentes biológicos infecciosos y productos químicos tóxicos a través del agua de consumo puede causar enfermedades graves, como infecciones gastrointestinales y cáncer. Comprender los patrones de contaminación y los procesos biogeoquímicos permitirá diseñar estrategias de mitigación que protejan la salud humana y mejoren la calidad del agua.

Referencias bibliográficas

Chidiac, S., El Najjar, P., Ouaini, N., El Rayess, Y., & El Azzi, D. (2023). A comprehensive review of water quality indices (WQIs): history, models, attempts and perspectives. **Rev Environ Sci Biotechnol**, 22(2), 349-395. <https://doi.org/10.1007/s11157-023-09650-7>

- CONAGUA, C. N. del A. (2018). Diagnóstico de calidad del agua de la Región Hidrológica Lerma Santiago Pacífico (p. 63). https://files.conagua.gob.mx/conagua/generico/calidad_del_agua/diagnostico_lerma_santiago_pacifico_2012-2018.pdf
- Fang, X., Hu, J., & Sharma, S. (2023). Water quality modeling and monitoring. **Water**, 15(18), 3216. <https://doi.org/10.3390/w15183216>
- Geypens, M., Vanderdriech, E. J., Gonçalves, L., KCFS, M., & SASAKI, C. (2012). APHA, AEG; AWWA, ADE; WEF, LSC Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater. Washington DC; American Public Health Association, 1995. ATLAS, RM; BARTHA, R. Microbial Ecology—Fundamentals and Applications. New York: Addison Wesley Longman In. FRANCIHELE CARDOSO MÜLLER, 42.
- Gervasio, M. P., Soana, E., Granata, T., Colombo, D., & Castaldelli, G. (2022). An unexpected negative feedback between climate change and eutrophication: higher temperatures increase denitrification and buffer nitrogen loads in the Po River (Northern Italy). **Environ. Res. Lett.**, 17, 84031. <https://doi.org/10.1088/1748-9326/abcde8>
- Gutiérrez, J., Flores, A., & Jiménez, B. (2022). Water quality in Mexican rivers: Current status and future challenges. **Environmental Science and Pollution Research**, 29(8), 11023-11036. <https://doi.org/10.1007/s11356-021-15627-0>
- Holbach, A., Norra, S., & others. (2022). Insights into phytoplankton dynamics and water quality monitoring with the BIOFISH at the Elbe River, Germany. **Water**, 14(13), 2078. <https://doi.org/10.3390/w14132078>
- IPCC (Intergovernmental Panel on Climate Change) (2014), “Anexo II: Glosario”, en Mach, Katharine J.; Planton, Serge; von Stechow, Christoph, *Cambio climático 2014: Informe de síntesis. Contribución de los Grupos de trabajo I, II y III al Quinto Informe de Evaluación del Grupo Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático, Ginebra, IPCC, pp. 127-141.*
- IIEG de Jalisco. Instituto de Información de Geografía y Estadística del Estado de Jalisco. Población y Sociedad. Medio Ambiente. Acceso en: <https://ieeg.gob.mx/ns/>
- Kumar, P., Sharma, P. K., Kumar, P., Sharma, M., & Butail, N. P. (2021). Agricultural sustainability in Indian Himalayan region: Constraints and potentials. *Indian Journal of Ecology*, 48(3), 649-661.
- ONU (Organización Naciones Unidas). Objetivos del Desarrollo Sostenible. 2015-2030. Acceso en <https://www.un.org/sustainabledevelopment/es/water-and-sanitation/>
- Peniche, S., et al. (2022). Can economics save Jalisco’s toxic Santiago River? **Mexico News Daily**. Retrieved from [Mexico News Daily](<https://mexiconewsdaily.com>).
- Norma Oficial Mexicana NOM-001-SEMARNAT-2021, Que establece los límites permisibles de contaminantes en las descargas de aguas residuales en cuerpos receptores propiedad de la nación. DOF:11/03/2022 https://www.dof.gob.mx/nota_detalle.php?codigo=5645374&fecha=11/03/2022&print=true
- Ley Federal de Derechos de Agua. Ley Federal de Derechos Disposiciones Aplicables en Materia de Aguas Nacionales 2021. CONAGUA. Comisión Nacional del Agua. https://www.gob.mx/cms/uploads/attachment/file/635527/CGRF-1-21_LFD_VF.pdf
- Masters, G. M., Ela, W. P., & Parra, Y. D. (2008). Introducción a la ingeniería medioambiental.

Pearson educación.

- Murthy, G. K., & Cox, S. (1988). Evaluation of APHA and AOAC methods for phosphatase in cheese. *Journal of the Association of Official Analytical Chemists*, 71(6), 1195-1199.
- Robledo-Hernández, J. A. (2023). Evaluación del Índice de Calidad de Agua ICA-NSF en las microcuencas del Parque Nacional Río Dulce como herramienta en la gestión integral del manejo sustentable, Livingston, Izabal, Guatemala, Centroamérica. *Revista Tecnología En Marcha*, 36(1), 106-116.
- Syeed, M. M. M., Hossain, M. S., Karim, M. R., Uddin, M. F., Hasan, M., & Khan, R. H. (2023). Surface water quality profiling using the water quality index, pollution index and statistical methods: A critical review. **Environmental and Sustainability Indicators**, 18, 100247. <https://doi.org/10.1016/j.indic.2023.100247>
- Teran-Velasquez, G., Helm, B., & Krebs, P. (2022). Longitudinal river monitoring and modeling substantiate the impact of weirs on nitrogen dynamics. **Water**, 14(2), 189. <https://doi.org/10.3390/w14020189>
- Thorslund, J., Bierkens, M. F. P., Oude Essink, G. H. P., Sutanudjaja, E. H., & van Vliet, M. T. H. (2021). Common irrigation drivers of freshwater salinisation in river basins worldwide. **Nat. Commun.**, 12, 4232. <https://doi.org/10.1038/s41467-021-24535-3>

TABLAS Y GRÁFICOS

Tabla 1. Clases de calidad del agua y su traducción a la escala de valores

Clases de calidad del agua	Requerimientos legales	Escala de valores
Excalente	Cumplido	100 – 91
Buena		90 – 71
Moderada	No cumplido	70 – 51
Pobre		50 – 26
Mala		25 – 0

Fuente:

Tabla 2. Características fisicoquímicas del punto RS-04 (Salto-Río Santiago) examinado a través del tiempo

Año	Parámetros	Media	Mediana	DE	Xmin	Xmax	Curtosis	Asimetría
2009	OD (mg/L)	0.35	0.00	0.77	0.00	2.20	3.08	2.02
	CF(MPN)	450,000.00	195,000.00	463,938.454	15,000.00	1,100,000.00	-1.41	0.81
	pH	7.69	7.59	0.35	7.35	8.42	0.82	1.22
	DBO5 (mg/L)	22.52	19.31	10.57	8.88	44.00	1.05	1.24
	T (oC)	22.26	23.00	2.87	18.00	26.00	-1.22	-0.44
	PT (mg/L)	3.17	2.49	2.89	0.37	9.58	1.73	1.36
	NO3-(mg/L)	0.12	0.10	0.07	0.10	0.32	10.00	3.16
	Turbiedad(NTU)	19.52	20.00	8.51	8.73	37.15	0.70	0.85
	SDT	626.60	699.00	195.53	185.00	836.00	1.97	0.69
2010	OD (mg/L)	1.09	0.65	0.87	0	2.30	-1.76	0.25
	CF (MPN)	2,409,454.55	1,100,000.00	3,908,299.99	15,000.00	1,100,000.00	2.00	1.83
	pH	7.52	7.50	0.15	7.34	7.83	1.28	0.92
	DBO (mg/L)	24.53	30.54	14.32	3.57	43.08	-1.64	-0.27
	T (oC)	21.33	21.40	3.86	15.40	25.90	1.28	-0.38
	PT (mg/L)	4.55	4.81	2.77	1.04	8.41	-2.04	0.02
	NO3-(mg/L)	0.38	0.10	0.48	0.10	1.50	1.28	1.67
	Turbiedad (NTU)	155.49	70.00	299.02	15.00	1,051.00	1.28	3.24
	SDT	693.82	73.00	184.06	385.00	949.00	1.28	-0.44
2011	OD (mg/L)	1.32	1.54	1.25	0	3.50	-0.21	0.48
	CF (MPN)	1,901,250.00	350,000.00	3,750,502.58	210,000.00	11,000,000.00	7.05	2.63
	pH	7.59	7.62	0.24	7.18	7.89	1.48	-0.56
	DB0 (mg/L)	32.52	41.09	18.162	6.02	49.20	-1.24	-0.63
	T (oC)	24.09	24.15	3.49	19.70	30.80	1.05	0.77
	PT (mg/L)	4.37	4.39	1.65	2.13	6.49	-1.36	-0.17
	NO3- (mg/L)	0.29	0.18	0.34	0.10	1.12	7.29	2.66
	Turbiedad (NTU)	66.20	75.00	34.92	4.60	110.00	-0.14	-0.74
	SDT	638.12	796.00	388.75	8.00	977.00	1.48	-1.29
2012	OD (mg/L)	3.63	3.95	1.33	0.80	4.90	1.29	-1.25
	CF (MPN)	12,341,477.78	93,000.00	36,622,223.29	4,300	110,000,000.00	9.00	3.00
	pH	7.55	7.58	0.19	7.22	7.84	0.23	-0.46
	DBO (mg/L)	9.16	7.71	4.719	3.29	15.96	-1.25	0.45
	T (oC)	22.81	24.10	2.74	16.70	24.90	2.46	-1.69
	PT (mg/L)	3.22	3.37	1.71	0.80	5.82	-1.10	0.26
	NO3-(mg/L)	0.37	0.25	0.28	0.10	0.87	-0.75	0.74
	Turbiedad (NTU)	18.70	11.00	17.01	2.70	50.00	-0.49	0.97
	SDT	778.67	700.00	185.34	512.00	1,080.00	-0.73	0.46
2013	OD (mg/L)	3.97	4.27	1.03	2.50	5.40	-1.79	-0.02
	CF (MPN)	79,152.73	15,000.00	142,059.07	430.00	460,000.00	5.53	2.33

	pH	7.67	7.64	0.15	7.47	7.93	-0.58	0.27
	DBO (mg/L)	7.50	7.65	4.56	2.03	17.04	0.35	0.84
	T (°C)	23.37	23.80	3.02	17.10	27.60	0.59	-0.81
	PT (mg/L)	2.67	2.61	0.79	1.62	3.80	-1.57	0.13
	NO3- (mg/L)	1.86	1.32	2.23	0.10	7.49	3.75	1.94
	Turbiedad (NTU)	27.39	5.60	67.49	1.40	230.00	10.75	3.26
	SDT	641.91	719.00	344.679.00	30.00	1,020.00	0.00	-0.99
2014	OD (mg/L)	3.10	2.96	1.10	1.40	4.90	-0.90	-0.04
	CF (MPN)	229,775.45	46,000.00	37,056.11	230.00	1,100,000.00	1.28	1.99
	pH	7.49	7.54	0.15	7.21	7.66	-0.34	-0.91
	DBO (mg/L)	7.66	8.04	4.04	3.07	14.93	1.28	0.66
	T (oC)	22.91	23.80	3.04	17.40	27.20	-0.61	-0.49
	PT (mg/L)	2.95	3.22	0.89	1.79	4.09	-1.96	-0.16
	NH3 -(mg/L)	0.19	0.10	0.19	0.10	0.70	5.00	2.33
	Turbiedad (NTU)	10.51	10.00	10.37	1.80	37.00	3.99	1.89
	SDT	723.81	791.00	197.75	405.00	961.00	-1.18	-0.40
2015	OD (mg/L)	2.17	1.97	0.72	1.40	3.70	0.22	1.00
	CF(MPN)	888,454.55	240,000.00	130,929.86	93,000.00	4,600,000.00	7.78	2.65
	pH	7.46	7.49	0.15	7.13	7.67	1.68	-1.03
	DBO (mg/L)	11.44	9.00	7.57	5.88	32.50	6.97	2.49
	T (oC)	23.79	24.50	33.46	17.50	28.50	-0.36	-0.78
	PT (mg/L)	3.00	3.04	0.89	1.86	4.37	-1.20	0.28
	NO3- (mg/L)	0.27	0.10	0.48	0.10	1.72	10.68	3.25
	Turbiedad (NTU)	7.97	7.20	5.01	2.20	17.30	-0.62	0.63
	SDT	765.82	783.00	155.40	513.00	1,004.00	-0.47	-0.36
2016	OD (mg/L)	2.46	2.36	1.12	1.20	3.80	-2.30	0.16
	CF (MPN)	1,288,800.00	240,000.00	1,947,520.40	11,000.00	4,600,000.00	2.96	1.77
	pH	7.49	7.47	0.23	7.21	7.85	0.91	0.23
	DBO (mg/L)	16.05	9.42	15.93	4.02	43.80	4.01	-0.53
	T (oC)	24.26	24.40	2.13	21.10	26.90	1.03	-0.54
	PT (mg/L)	2.51	2.36	0.81	1.63	3.35	-2.88	0.18
	NO3 (mg/L)	0.15	0.10	0.12	0.10	0.37	5.00	2.24
	Turbiedad (NTU)	37.34	7.70	68.63	3.20	160.00	4.96	2.23
	SDT	734.40	823.00	231.76	494.00	927.00	-3.14	-0.47
2017	OD (mg/L)	0.63	0.09	1.43	0.10	3.90	7.00	2.65
	CF (MPN)	5,620,000.00	2,400,000.00	8,266,567.20	240,000.00	24,000,000.00	6.15	2.43
	pH	7.59	7.66	0.18	7.34	7.76	-1.21	-0.88
	DBO (mg/L)	24.71	19.20	13.93	9.60	42.00	-2.46	0.26
	T (oC)	22.17	24.00	3.06	16.00	24.00	2.68	-1.78
	PT (mg/L)	3.21	3.10	0.99	1.88	4.44	-1.76	-0.11

	NO ₃ -(mg/L)	0.10	0.10	0.00	0.10	0.10		
	Turbiedad (NTU)	23.71	13.00	21.36	5.30	60.00	-0.48	1.00
	SDT	664.14	653.00	175.32	440.00	918.00		
2018	OD (mg/L)	1.51	1.52	1.25	0.00	4.20	1.02	0.82
	CF (MPN)	4,320,909.09	4,600,000.00	2,682,202.28	430,000	11,000,000.00	3.97	1.33
	pH	7.43	7.40	0.24	7.00	7.70	-0.76	-0.44
	DBO (mg/L)	17.29	13.32	7.67	10.56	34.80	1.49	1.46
	T (oC)	20.73	22.00	2.53	15.00	23.00	1.30	-1.29
	PT (mg/L)	3.34	3.49	1.71	0.96	6.72	0.18	0.40
	NO ₃ - (mg/L)	0.10	0.10	0.00	0.10	0.10		
	Turbiedad (NTU)	20.52	10.00	25.93	2.60	85.00	3.30	1.92
	SDT	700.45	745.00	161.47	444.00	889.00	-1.57	-0.24
2019	OD (mg/L)	2.50	2.73	1.70	0.00	5.20	-1.09	-0.11
	CF (MPN)	5,745,454.55	4,600,000.00	3,609,809.87	1,100,000.00	11,000,000.00	-0.83	0.65
	pH	7.35	7.40	0.33	6.80	7.70	-0.47	-0.85
	DBO (mg/L)	45.45	29.70	33.22	7.80	101.40	-1.44	0.49
	T (oC)	19.73	20.00	2.53	16.00	23.00	-1.20	-0.21
	PT (mg/L)	3.18	3.45	0.82	2.05	4.25	-1.19	-0.39
	NO ₃ -(mg/L)	0.19	0.10	0.13	0.10	0.40	0.57	1.15
	Turbiedad (NTU)	41.49	33.00	36.19	4.40	100.00	-1.46	-0.27
	SDT	679.09	712.00	143.93	451.00	888.00	-1.17	-0.27
2020	OD (mg/L)	2.89	3.16	2.61	0.10	5.60	-2.98	-0.12
	CF(MPN)	3,150,000.00	1,100,000.00	4,460,661.39	150,000.00	11,000,000.00	4.36	2.06
	pH	7.36	7.50	0.34	7.00	7.70	-3.04	-0.41
	DBO (mg/L)	28.42	20.76	16.89	13.98	53.40	-0.78	0.96
	T (oC)	18.40	18.00	2.07	16.00	21.00	-1.96	0.24
	PT (mg/L)	4.54	4.66	1.16	3.08	5.84	-2.06	-0.21
	NO ₃ - (mg/L)	0.26	0.29	0.11	0.14	0.37	-2.93	-0.31
	Turbiedad (NTU)	16.05	4.90	37.43	1.00	65.00	4.90	2.21
	SDT	786.00	771.00	72.73	696.00	871.00	-1.93	0.05

OD, oxígeno disuelto; CF, coliformes fecales; MPN, número más probable; DBO, demanda bioquímica de oxígeno; NO₃-, nitratos; T, temperatura; PT, fósforo total; NTU, unidades nefelométricas de turbidez; SDT, sólidos disueltos totales; DE: desviación estándar; X, valor.

Tabla 3. Normatividad en agua. Ley Federal de Derechos de Agua

Parámetros	Ley Federal de Derechos de Agua (LFDA 2021)
OD (mg/L)	5
CF (MPN/100ml)	1000
pH	6-8.5
DBO (mg/L)	-
T (oC)	+1.5
PT (mg/L)	0.05
NO ₃ -(mg/L)	0.06
Turbiedad (NTU)	10
SDT	500

OD, oxígeno disuelto; CF, coliformes fecales; MPN, número más probable; DBO, demanda bioquímica de oxígeno; NO₃-, nitratos; T, temperatura; PT, fósforo total; NTU, unidades nefelométricas de turbidez; SDT, sólidos disueltos totales.

Tabla 4. Parámetros estadísticos obtenidos del ICA en el sistema de agua superficial examinado

Año	Parámetros descriptivos del ICA					IC95%	p*
	Media ± DE	Mediana (X _{min} - X _{max})	Curtosis	Asimetría			
2009	33.90 ± 3.54	32.50 (31.00 – 42.00)	3.08	2.02	(31.37 – 36.43)	–	
2010	31.00 ± 4.52	30.00 (25.00 – 40.00)	1.28	0.91	(27.97 – 34.03)	0.86	
2011	30.75 ± 4.17	29.50 (26.00 – 39.00)	1.48	1.69	(27.27 – 34.23)	0.86	
2012	36.78 ± 3.99	36.00 (33.00 – 45.00)	0.94	1.13	(33.71 – 39.85)	0.90	
2013	39.45 ± 4.95	37.00 (34.00 – 47.00)	-1.85	0.30	(36.13 – 42.78)	0.06	
2014	38.64 ± 4.13	38.00 (34.00 – 46.00)	-1.03	0.48	(35.86 – 38.00)	0.20	
2015	36.27 ± 2.57	37.00 (31.00 – 39.00)	0.15	-0.93	(34.54 – 38.00)	0.96	
2016	36.80 ± 6.53	34.00 (32.00 – 48.00)	3.34	1.82	(28.69 – 44.91)	0.97	
2017	33.14 ± 2.12	32.00 (31.00 – 36.00)	-2.23	0.33	(31.19 – 35.10)	1.00	
2018	34.27 ± 3.00	34.00 (28.00 – 40.00)	2.05	-0.37	(32.26 – 36.29)	1.00	
2019	32.00 ± 2.76	31.00 (28.00 – 37.00)	-0.35	0.63	(30.15 – 33.85)	0.99	
2020	34.40 ± 3.64	36.00 (28.00 – 37.00)	4.27	-2.03	(29.87 – 38.93)	1.00	
General	34.84 ± 4.64	34.50 (25.00 – 48.00)	0.34	0.57	(33.96 – 35.71)	–	

ICA, Índice de Calidad del Agua; DE, desviación estándar; X, valor; IC del 95%: intervalo de confianza del 95%.

Se realizaron comparaciones entre las medias obtenidas por ANOVA de una vía.

*valores de p resultantes de la comparación entre el valor obtenido del ICA del año de inicio del sistema de monitoreo (2009) y el ICA de años posteriores.

Tabla 5. Análisis de correlación

Variable	ICA		OD (mg/L)		CT (MPN)		pH		DBO (mg/L)		T (°C)		PT (mg/L)		NO3- (mg/L)		Turbiedad (NTU)		SDT	
	r	p	r	p	r	p	r	p	r	p	r	p	r	p	r	p	r	p	r	p
OD (mg/L)	0.514	≤0.001	1.000	-	0.080	0.41	0.102	0.29	-0.371	≤0.001	-0.062	0.52	-0.208	0.03	0.308	0.001	-0.152	0.11	0.037	0.70
CT (MPN)	-0.161	0.92	0.080	0.41	1.00	-	-0.175	0.07	0.121	0.21	-0.073	0.45	0.073	0.45	-0.072	0.45	0.068	0.48	-0.025	0.79
pH	0.076	0.43	0.102	0.29	-0.175	0.07	1.00	-	-0.137	0.15	0.075	0.435	0.092	0.34	0.021	0.83	-0.052	0.59	0.374	≤0.001
DBO (mg/L)	-0.573	≤0.001	-0.371	≤0.001	0.121	0.21	-0.137	0.15	1.00	-	-0.189	0.05	0.249	0.009	-0.198	0.04	0.158	0.10	-0.060	0.53
T (°C)	-0.078	0.42	-0.062	0.52	-0.073	0.45	0.075	0.43	-0.189	0.05	1.00	-	-0.245	0.01	0.056	0.56	-0.072	0.46	-0.195	0.04
TP (mg/L)	-0.455	≤0.001	-0.208	0.03	0.073	0.45	0.092	0.34	0.249	0.009	-0.245	0.01	1.00	-	-0.122	0.20	0.088	0.36	0.391	≤0.001
NO3- (mg/L)	0.135	0.16	0.308	0.001	-0.072	0.45	0.021	0.83	-0.198	0.04	0.056	0.56	-0.122	0.20	1.00	-	0.037	0.70	-0.285	0.003
Turbiedad (NTU)	-0.345	≤0.001	-0.152	0.11	0.068	0.48	-0.052	0.59	0.158	0.10	-0.072	0.46	0.088	0.36	0.037	0.70	1.00	-	-0.142	0.14
SDT	0.034	0.72	0.037	0.70	-0.025	0.79	0.374	≤0.001	-0.060	0.53	-0.195	0.04	0.391	≤0.001	-0.285	0.003	-0.142	0.13	1.00	-

OD, oxígeno disuelto; C.T., coliformes fecales; MPN, número más probable; DBO, demanda bioquímica de oxígeno; NO3-, nitratos; T, temperatura; PT, fósforo total; NTU, unidades nefelométricas de turbidez; SDT, sólidos disueltos totales

Figura 1. Localización zona de estudio, río Santiago entre El Salto y Juanacatlán, Jalisco

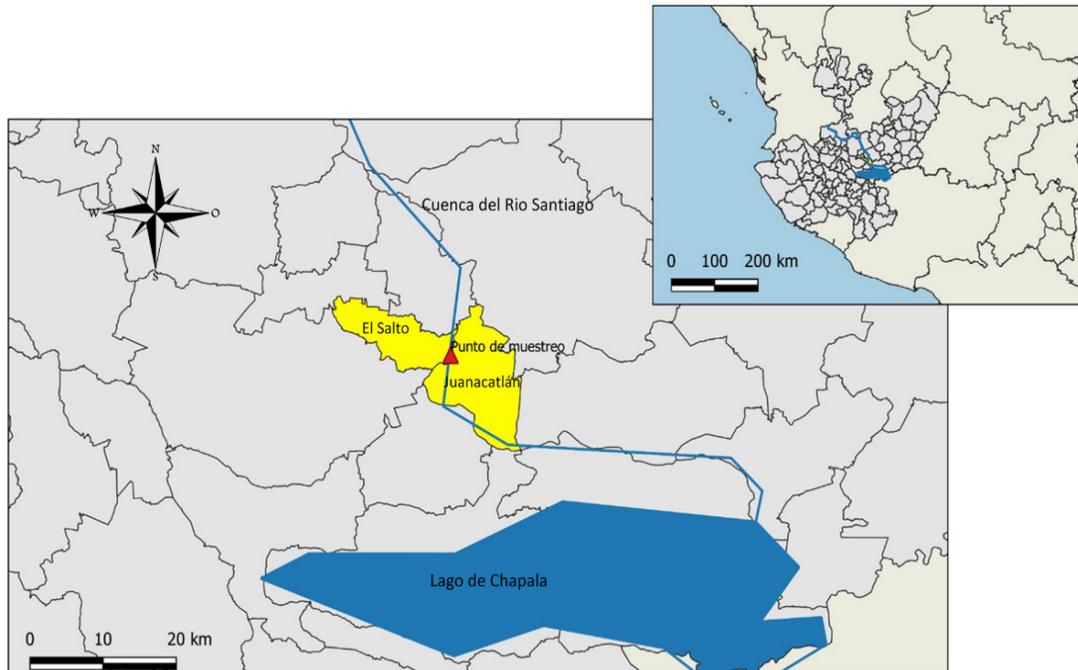


Figura 2. Cascada de Río Santiago



Figura 3. Calidad de agua del río Santiago, con la presencia de espuma y residuo



Figura 4. Comportamiento en el tiempo del ICA del punto evaluado

