

Evaluación ecotoxicológica y fisicoquímica de la calidad del agua en el Río Pasto a través de un Índice *Fuzzy* de Calidad

Santiago Gómez Herrera, Félix David Rivera Madroño, Sandra Milena Enríquez Delgado, Mario Alberto Jurado Eraso

Programa de Ingeniería Ambiental. Facultad de Ciencias Agrícolas. Ciudadela Universitaria Torobajo. Universidad de Nariño. Pasto. Colombia. E-mail: sgh525@hotmail.com.

Resumen. En los últimos años, los métodos basados en lógica difusa han demostrado ser apropiados para abordar la incertidumbre y la subjetividad en los problemas ambientales. En el presente estudio, se usó una prueba de fitotoxicidad utilizando semillas de *Lactuca sativa* y parámetros fisicoquímicos para evaluar la calidad del agua del Río Pasto (Colombia), actualmente contaminado por vertimiento industriales ligados al curtido de pieles animales, a través del Índice *Fuzzy* de Calidad del Agua. El modelo adaptado tuvo en cuenta parámetros como oxígeno disuelto, pH, demanda química de oxígeno, conductividad eléctrica, sólidos suspendidos totales y la concentración efectiva que inhiba el 50% de la germinación de las semillas (CE_{50}). Los resultados arrojados por el software Matlab, muestran que la calidad del agua del Río Pasto presenta una tendencia a la baja y su estado general es Regular, concluyendo así que dichas aguas tienen un efecto toxicológico lo suficientemente nocivo para inhibir el desarrollo normal de *Lactuca sativa*.

Palabras clave: Evaluación de la calidad del agua; Índice *fuzzy* de calidad; *Lactuca sativa*; Aguas residuales industriales.

Abstract. *Ecotoxicological and physicochemical assessment of water quality in Pasto River based on Fuzzy Quality Index.* In last years, the fuzzy logic indexes demonstrated to be proper to address uncertainty and subjectivity in environmental problems. In the present study, a phytotoxicity test using seeds of *Lactuca sativa* and physicochemical parameters were used to evaluate the water quality of Pasto River (Colombia), currently contaminated with leather tannery wastewater effluents, based on *fuzzy* water quality index. The adapted model considered parameters such as dissolved oxygen, ph, chemical oxygen demand, electrical conductivity, total suspended solids, and the effective concentration that inhibits 50% of seeds germination (EC_{50}). The assessment results in Matlab software, show that Pasto River water quality presents a downward trend and the overall water quality is regular; concluding that the effluent has a harmful

Recebida:
31/08/2018

Aceptado:
29/11/2018

Publicado:
31/12/2018



Open access



ORCID

0000-0002-4310-8420
Santiago Gómez
Herrera

0000-0003-2752-4026
Félix David Rivera
Madroño

0000-0002-9831-5953
Sandra Milena
Enríquez Delgado

0000-0002-3878-3704
Mario Alberto Jurado
Eraso

toxicological effect enough to inhibit the normal development of *Lactuca sativa*.

Keywords: Water quality assessment; *Fuzzy Quality Index*; *Lactuca sativa*; Industrial wastewater.

Resumo. *Avaliação ecotoxicológica, física e química da qualidade da água do Rio Pasto através de um Índice Fuzzy de Qualidade.* Nos últimos anos, os métodos baseados na lógica difusa tem demonstrado serem apropriados para abordar a incerteza e a subjetividade nos problemas ambientais. No presente estudo, foi usado uma prova de fitotoxicidade utilizando sementes de *Lactuca sativa* e parâmetros físicos e químicos para avaliar a qualidade da água do Rio Pasto (Colômbia), atualmente contaminado por efluentes industriais ligados ao curtume de peles de animais, através do Índice *Fuzzy* de Qualidade da Água. O modelo adaptado levou em consideração parâmetros como oxigênio dissolvido, pH, demanda química de oxigênio, condutividade elétrica, sólidos totais e a concentração efetiva que iniba 50% da germinação de sementes (CE_{50}). Os resultados obtidos pelo software Matlab mostram que a qualidade da água do Rio Pasto apresenta uma tendência à baixa e seu estado geral é regular, concluindo-se assim que essas águas tem um efeito toxicológico suficientemente nocivo para inibir o desenvolvimento normal de *Lactuca sativa*.

Palavras-chave: Avaliação da qualidade da água; Índice *Fuzzy* de Qualidade; *Lactuca sativa*; Águas residuais industriais.

Introducción

Los ríos son la principal fuente de suministro de agua superficial que se utiliza para beber, consumo del hogar, riego y fines industriales (Islam et al., 2015), pero debido a su accesibilidad flexible para la eliminación de desechos, su vulnerabilidad se ha acrecentado convirtiendo a los ríos en estaciones de vertido que reciben una gran cantidad de desechos de industrias y municipales (Kamal et al., 1999).

Actualmente es entendido que la liberación de contaminantes en las superficies de agua puede modificar las características del medio ambiente y, en consecuencia, cambiar la condición acuática preexistente de vida (Watanabe et al., 2017). Es por ello fundamental, evaluar el estado de las fuentes hídricas en el marco de un escenario de contaminación intensa para velar por el

equilibrio de los ecosistemas fluviales; así como también porque dichos vertimientos, en muchos casos proveniente de fuentes industriales y comerciales, contienen sustancias tóxicas en altas concentraciones que pueden interferir con las obras de tratamiento que reciben esta descarga (Serpa et al., 2014).

Este es el caso del Río Pasto (Colombia), que es el afluente principal de la ciudad con el mismo nombre y que se considera un tributario vital para el abastecimiento de agua tanto para las comunidades rurales como para el sector urbano. Históricamente el Río Pasto ha sido un polo de desarrollo local, por lo que sus riberas han sido ocupadas en su gran mayoría convirtiéndose en el receptor principal de todas las aguas residuales generadas en la región (López, 2009), incluyendo las relacionadas a la industria del curtido de pieles animales,

una actividad fuertemente arraigada y culturalmente aceptada, pero que genera impactos severos en la calidad del río dadas las altas concentraciones de metales pesados como Hierro y Cromo (Calvachi et al., 2009; Rosero et al., 2011).

Bajo ese panorama, hoy en día se requieren herramientas que permitan la gestión de los recursos naturales de manera rápida y confiable, con el menor grado de subjetividad posible (Bichai y Smeets, 2013; Ocampo-Duque, 2009; Wong y Hu, 2014). No obstante, la Evaluación de la Calidad del Agua (ECA) de las fuentes hídricas regularmente depende de interpretaciones subjetivas. Así, por ejemplo, depende de la interpretación de los valores numéricos de ciertos parámetros fisicoquímicos o biológicos, o de la concentración de algunos compuestos químicos en la masa de agua (Ocampo-Duque, 2009; Lessels y Bishop, 2013). En consecuencia, carece de una comprensión holística del funcionamiento del ecosistema, pues no se tienen en cuenta los posibles efectos de los xenobióticos liberados al agua sobre la salud humana y los sistemas vivos (Serpa et al., 2014).

Para superar tales limitaciones, en la actualidad se reportan numerosas estrategias técnicas, tales como: El empleo de novedosos índices de calidad del agua, diferentes tipos de bioensayos y bioindicadores o el uso de modernas herramientas matemáticas e informáticas, entre otras (Di Paolo et al., 2016; Guan et al., 2017). Tal es el caso de la Lógica *Fuzzy*, un método no determinista (Li et al., 2016) que como su propio nombre lo indica permite integrar información incierta, subjetiva y difusa para obtener resultados lingüísticos confiables para la toma de decisiones (Chau, 2006), reduciendo la incertidumbre en la interpretación de los valores numéricos de los parámetros (Wang et al., 2015).

Generalmente, los índices *fuzzy* de calidad abarcan dentro de su análisis parámetros fisicoquímicos, metales

pesados o compuestos orgánicos de interés. En este caso, se pretende incluir, además de la evaluación fisicoquímica, una variable ecotoxicológica adicional dentro del modelo dado que los bioensayos proporcionan información más realista sobre los riesgos de las mezclas contaminantes desconocidas, a razón de que tienen en cuenta los efectos sinérgicos, antagónicos o aditivos de los factores estresantes en el medio acuático (Serpa et al., 2014).

El bioensayo se enfocó en el uso de *Lactuca sativa*, una especie de planta modelo para pruebas de fitotoxicidad que ha sido recomendada por muchas organizaciones internacionales como ISO, USEPA o OCDE (Lyu et al., 2018) y usada ampliamente para probar la toxicidad de productos químicos puros, así como efluentes (Dutka, 1989; Castillo et al., 2000; Fjällborg et al., 2006; Charles et al., 2011; Park et al., 2016; Lyu et al., 2018) gracias a su sensibilidad característica (Thomas et al., 1986) y la simplicidad, rapidez, confiabilidad y bajo costo en el desarrollo de sus pruebas (Charles et al., 2011; Park et al., 2016).

En este sentido, el presente estudio evaluó los efectos ecotoxicológicos de las aguas del Río Pasto, antes y después de las industrias del curtido de pieles, a través de bioensayos con *Lactuca sativa*, bajo condiciones controladas de laboratorio, que permitan verificar cómo estas sustancias afectan el desarrollo de la planta en función de su germinación, correlacionando los resultados encontrados con las características fisicoquímicas del agua del cauce con base en un Índice *Fuzzy* de Calidad.

Materiales y métodos

Área de estudio y muestreo de agua

El Río Pasto es la fuente hídrica más importante de San Juan de Pasto pues atraviesa toda la ciudad y abastece en su totalidad a su acueducto principal que cubre el 85% de la población de la ciudad (Narváez et al., 2016). Su cuenca

es uno de los afluentes destacados del Río Juanambú, el cual hace parte de la gran cuenca del Río Patía que nace en la vertiente occidental del sistema orográfico de los Andes en el Departamento de Nariño, al suroccidente de Colombia. La cuenca del Río Pasto tiene una superficie total de 483.32 km² aproximadamente, y una longitud aproximada de su cauce principal de 57.60 km, medidos desde la unión de las quebradas El Retiro y Las Tiendas, hasta la desembocadura en el Río Juanambú (López, 2009).

La colecta se llevó a cabo en la parte baja del Río Pasto, en los meses de marzo y mayo del año 2017, en el tramo conocido como Chapultepec (1° 13' 59.7" N; 77° 17' 13.5" W) y en la Estación Meteorológica IDEAM El Polvorín (1° 14' 04.0" N; 77° 17' 34.7" W). Los puntos de muestreo se eligieron a una distancia aproximada de 50 m aguas arriba y aguas abajo del punto de descarga de las industrias del curtido de pieles. Las muestras de agua se obtuvieron a una profundidad de 30 cm y aproximadamente en el centro del cauce, a lo ancho del río; siendo transportadas bajo refrigeración (4 °C) en contenedores de vidrio ámbar esterilizados y procesadas dentro de las 24 h posteriores a su recolección. Los parámetros fisicoquímicos oxígeno disuelto (OD), conductividad eléctrica (CE), pH, sólidos suspendidos (SST) y demanda química de oxígeno (DQO) fueron seleccionados para evaluar la calidad del agua del Río Pasto.

Material biológico

Los ensayos ecotoxicológicos se llevaron a cabo en semillas de lechuga (*Lactuca sativa* var. Simpson), obtenidas en paquetes de 300 semillas en centros de distribución locales que fueron almacenadas a temperatura ambiente. Se descartaron las semillas dañadas y se utilizaron las de un mismo lote y tamaño.

Protocolo del bioensayo

El bioensayo de toxicidad con semillas de lechuga es una prueba de

toxicidad aguda evaluada a las 96 h, de acuerdo con el procedimiento de la EPA de EEUU (1996) y el Instituto Nacional de Investigación del Agua de Canadá (Dutka, 1989), en la que se pueden determinar los efectos fitotóxicos en el desarrollo de la plántula durante los primeros días de crecimiento. Para la prueba, se usaron cajas de Petri de 100 mm de diámetro en las cuales se incorporó 20 semillas de características similares, sobre papel filtro Whatman humedecido con 5 mL de muestra a distintas disoluciones en referencia a la proporción Agua cruda: Agua destilada de 5:0, 3:2 y 1:4; con 3 repeticiones por cada concentración evaluada. Las cajas de Petri se recubrieron con papel Parafilm® para evitar su desecación y se ubicaron en una incubadora Scientific® a 22 °C ± 1 °C en condiciones de oscuridad. A posteriori al periodo de incubación, se contó la cantidad de semillas germinadas en pro de determinar la concentración efectiva que inhiba el 50% de la germinación para la muestra (CE₅₀).

Los tratamientos incluyeron testigos, usando como control negativo agua destilada y como control positivo ZnCl, para este último se realizaron pruebas de sensibilidad de la especie en estudio con el tóxico de referencia seleccionado, con lo que se determinó a través de la CE₅₀ el valor que inhibía la germinación de la mitad de las semillas.

Análisis de datos

Una vez se obtuvieron los resultados, se hizo el análisis estadístico adecuado para determinar la longitud promedio de las raíces de *Lactuca sativa*, se estableció el margen de error a partir de su desviación estándar. Se utilizó el software IBM SPSS Statistics 20 para el cálculo del CE₅₀ por medio del modelo matemático de toxicidad expresada en nivel del efecto letal (Método PROBIT), con un nivel de confianza del 95%. Para la categorización de los niveles de toxicidad se utilizó la relación propuesta en la batería de prueba de toxicidad de Watertox (Ronco et al., 2005).

Para el análisis con la metodología de lógica *fuzzy* se utilizó el software Matlab y su herramienta *Fuzzy*; para lo cual fue necesario usar un Sistema de Lógica *Fuzzy* (FIS) jerárquico planteado desde la literatura científica, en donde los conjuntos *fuzzy*, las funciones y reglas de fusificación estuvieron basadas en los planteamientos desarrollados por expertos (Ocampo-Duque et al., 2006; Ocampo-Duque, 2009; Seguí et al., 2013). Con esto fue posible calcular el Índice *Fuzzy* de Calidad del Agua (FQW) y así llevar a cabo un análisis exploratorio de la calidad de agua del tramo evaluado.

Vale aclarar que un sistema de inferencia *fuzzy* está compuesto por tres partes principales: Fusificación, inferencia *fuzzy* y defusificación (Li, 2006). El proceso de fusificación implica la transformación de las entradas de un valor numérico de una variable en una calificación de membresía, que describe una propiedad de la variable. La inferencia *fuzzy* incluye las operaciones

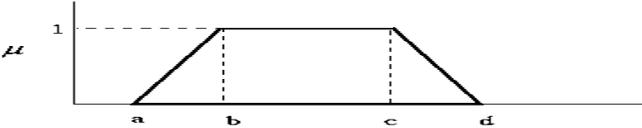
fuzzy de los antecedentes de múltiples partes, los métodos de implicación desde el antecedente hasta el consecuente para cada regla, y un método de agregación para unir los consecuentes a través de todas las reglas (Li et al., 2016). Finalmente, la defusificación consiste en transformar la salida *fuzzy* en un valor numérico no *fuzzy* que puede usarse en contextos no *fuzzy* (Ocampo-Duque et al., 2006).

En concordancia, en la Tabla 1 se presentan los conjuntos *fuzzy* trabajados y en la Tabla 2 las respectivas funciones de membresía (en forma trapezoidal) adaptadas (Ocampo-Duque et al., 2006; Ocampo-Duque, 2009; Seguí et al., 2013) para dichos conjuntos correspondientes a los parámetros fisicoquímicos de agua y de toxicidad. Una representación del FIS jerárquico adaptado para esta investigación se indica en la Figura 1 y por último en la Tabla 3, se presentan los motores de inferencia con sus respectivas reglas de inferencia "Si-Entonces".

Tabla 1. Conjuntos *fuzzy* adaptados con base en la literatura científica.

Tipo de conjunto <i>fuzzy</i>	Variables involucradas
Parámetros Fisicoquímicos Primarios (PFQP)	OD, pH, DQO, CE, SST
Toxicidad (TOX)	Valores de EC ₅₀ para ensayos con <i>Lactuca sativa</i>

Tabla 2. Parámetros y funciones de membresía para agua y toxicidad.



Grupo	Indicador	Unidades	Conceptos lingüísticos									Rango	
			"Bajo"			"Medio"			"Alto"				
			a=b	C	D	A	B	C	D	A	B		c=d
PFQP	OD	mg/L	0	3	4	3	4	7	8	7	8	12	0-12
	pH	-	0	6	7,5	6	7	8	9	7,5	9	14	0-14
	DQO	mg/L	0	12	25	20	28	36	45	40	120	200	0-200
	SST	mg/L	0	8	11	8	11	14	17	14	17	24	0-24
	CE	μS/cm	0	600	700	600	700	800	900	800	900	1400	0-1400
TOX	EC ₅₀	% v/v	0	52	80	70	78	84	95	85	110	160	0-160
	FWQ	-	"Mala"			"Regular"			"Buena"			Rango	
			0	40	50	40	50	70	80	70	80	100	0-100

Fuente: Adaptado de Ocampo-Duque (2009).

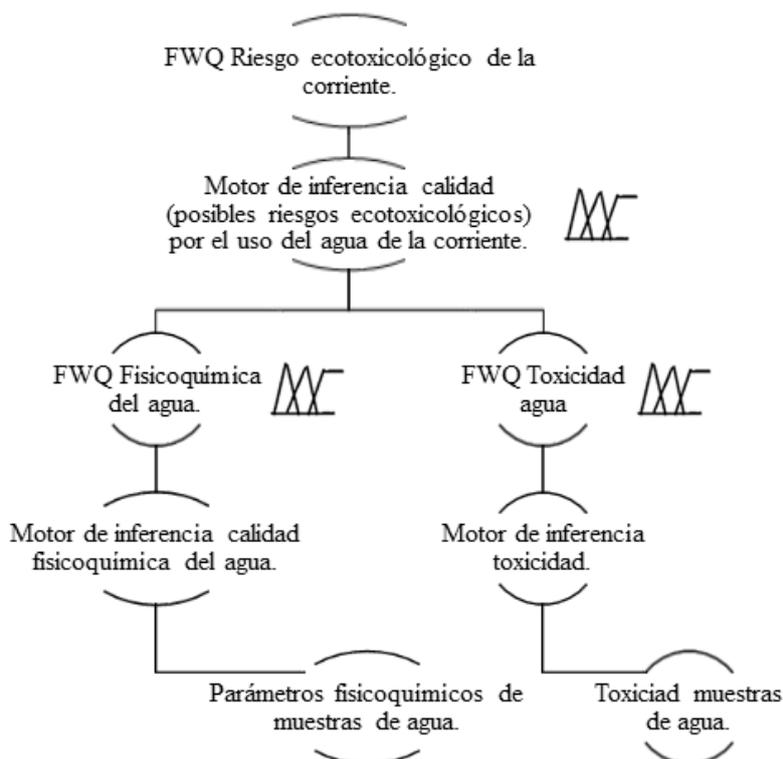


Figura 1. FIS jerárquico adaptado para este estudio.

Tabla 3. Reglas de inferencia “Si-Entonces”.

Motor de inferencia	Reglas Si-Entonces
Calidad fisicoquímica	-Si OD es “Bajo” Entonces la calidad del agua es “Mala”.
	-Si OD es “Medio” Entonces la calidad del agua es “Regular”.
	-Si OD es “Alto” Entonces la calidad del agua es “Buena”.
	-Si pH es “Bajo” Entonces la calidad del agua es “Mala”.
	-Si pH es “Medio” Entonces la calidad del agua es “Regular”.
	-Si pH es “Alto” Entonces la calidad del agua es “Buena”.
	-Si DQO es “Bajo” Entonces la calidad del agua es “Buena”.
	-Si DQO es “Medio” Entonces la calidad del agua es “Regular”.
	-Si DQO es “Alto” Entonces la calidad del agua es “Mala”.
Toxicidad	-Si CE es “Bajo” Entonces la calidad del agua es “Buena”.
	-Si CE es “Medio” Entonces la calidad del agua es “Regular”.
	-Si CE es “Alto” Entonces la calidad del agua es “Mala”.
	-Si EC50 en %v/v es “No toxico” Entonces la calidad del agua es “Buena”.
	-Si EC50 en %v/v es “Moderadamente toxico” Entonces la calidad del agua es “Regular”.
-Si EC50 en %v/v es “Toxico” Entonces la calidad del agua es “Mala”.	

Tabla 3. Continuación.

Calidad (y posibles riesgos ecotoxicológicos) por el uso del agua de la corriente	<p>-Si la calidad del agua es “Baja” y la toxicidad de la matriz agua es “Alta” ENTONCES la calidad (y posibles riesgos ecotoxicológicos) por el uso del agua de la corriente es “Mala” (Es decir, Alto Riesgo*).</p> <p>-Si la calidad del agua es “Baja” y la toxicidad del agua es “Moderada” ENTONCES la calidad (y posibles riesgos ecotoxicológicos) por el uso del agua de la corriente es “Mala”.</p> <p>-Si la calidad del agua es “Baja” y la toxicidad del agua es “Baja” ENTONCES la calidad (y posibles riesgos ecotoxicológicos) por el uso del agua de la corriente es “Regular”.</p> <p>-Si la calidad del agua es “Alta” y la toxicidad del agua es “Alta” ENTONCES la calidad (y posibles riesgos ecotoxicológicos) por el uso del agua de la corriente es “Regular”.</p> <p>-Si la calidad del agua es “Alta” y la toxicidad del agua es “Moderada” ENTONCES la calidad (y posibles riesgos ecotoxicológicos) por el uso del agua de la corriente es “Regular”.</p> <p>-Si la calidad del agua es “Alta” y la toxicidad del agua es “Baja” ENTONCES la calidad (y posibles riesgos ecotoxicológicos) por el uso del agua de la corriente es “Buena”.</p> <p>-Si la calidad del agua es “Moderada” y la toxicidad del agua es “Moderada” ENTONCES la calidad (y posibles riesgos ecotoxicológicos) por el uso del agua de la corriente es “Regular”.</p>
--	--

Resultados y discusión

Prueba de sensibilidad de *Lactuca sativa*

La prueba de sensibilidad de la especie en estudio, se llevó a cabo usando como tóxico de referencia Zn^{2+} a partir de Cloruro de Zinc ($ZnCl$) en cinco concentraciones: 10, 20, 40, 80 y 100 mg/L. Como resultado de dicha prueba, la concentración efectiva que inhibía la germinación de la mitad de las semillas fue 17,36 mg/L, con un intervalo de confianza del 95%.

Teniendo en cuenta los resultados obtenidos de CE_{50} para el Zn^{2+} , se puede afirmar que este valor es aceptable si se compara con otros estudios de gran similitud en donde se empleó el mismo reactivo en la misma concentración, duración y en donde se

reportaron respuestas entre 10 mg/L y 24,48 mg/L (Dutka, 1997; Castillo y Schäfer, 2000), en este orden de ideas nuestro resultado de 17,36 mg/L está dentro de ese rango, y confirma la veracidad de la prueba de sensibilidad de *Lactuca sativa* para el Zn^{2+} .

Determinación de la concentración de efectividad media (CE_{50}) y el nivel de toxicidad

Como se exhibe en la Tabla 4, el punto 1 de muestreo realizado en el mes de marzo la concentración efectiva que inhibe el 50% fue de 151,28 mostrando un nivel no tóxico de las aguas y para el mes de mayo 16,89 con un nivel extremadamente tóxico. Por otra parte, el punto 2 de muestreo para el mes de marzo y mayo fue de 30,47 siendo un nivel altamente tóxico.

Tabla 4. Nivel tóxico de los puntos de muestreo.

Punto de muestreo	CE ₅₀ %v/v	Nivel	Fecha de muestreo
Punto 1	151,28	No tóxico	Marzo
Punto 1	16,89	Extremadamente tóxico	Mayo
Punto 2	30,47	Altamente tóxico	Marzo
Punto 2	30,47	Altamente tóxico	Mayo

El presente estudio determina que la CE₅₀ del punto 1 es no tóxica para el mes de marzo, estos resultados pueden deberse, probablemente, a las constantes precipitaciones que se presentaron en el mes y que hicieron fluctuar las condiciones de los muestreos, lo que puede presentar que los niveles tóxicos no sean confiables; sin embargo, en el muestreo del mes de mayo los resultados fueron de 16,89 indicando un nivel extremadamente tóxico, más acorde al nivel de cargas contaminantes que presenta la fuente hídrica. Por otro lado, no se puede descartar que alrededor de la evaluación de dicho punto existiera menor sensibilidad de los metales en la muestra, puesto que el papel de filtro (método EPA) puede interactuar con los iones metálicos, reduciendo su biodisponibilidad en la germinación y la prueba de elongación de la raíz (Park et al., 2016).

Con respecto a los resultados para los muestreos del mes de marzo y mayo se establecieron en 30,47 con un nivel altamente tóxico; considerando la reducción del nivel de toxicidad del punto 1 con respecto al punto 2 se puede inferir un proceso de hormesis al mostrar un efecto contrario en la concentración efectiva al 50% (Azario et al., 2010). Hay que mencionar además que este fenómeno también se genera por procesos de sedimentación y menor movilidad de metales pesados que reaccionan con materia orgánica, sulfatos e hidróxidos, que ayudan a la asimilación de nutrientes por parte de la especie

objeto de estudio (Bohórquez-Echeverry y Campos-Pinilla, 2007).

El almidón es cuantitativamente el material de almacenamiento más abundante en semillas y es degradado por varias enzimas tales como amilasa para la germinación (Kong, 2013). Por lo tanto, la inhibición de reacciones enzimáticas específicas por los metales presentes en los vertimientos de las industrias asociadas al curtido de pieles es uno de los principales mecanismos detrás de la toxicidad del metal. Esto explica los efectos toxicológicos que se presentaron en los dos puntos de muestreo, donde el nivel de toxicidad es muy alto para la germinación de especies sensibles como la *Lactuca sativa*.

Análisis del Índice Fuzzy de Calidad del Agua

Teniendo en cuenta los resultados arrojados para el Índice Fuzzy de Calidad del Agua, donde se denota que en los dos puntos evaluados en los periodos de tiempo establecidos, las condiciones del cauce se pueden considerar regulares; estudios previos determinaron que existe un descenso de la biodiversidad de dicho punto, a partir de índices de Margalef y Simpson, dada la cantidad de descargas de aguas residuales no tratadas con cargas contaminantes asociadas a metales pesados, así mismo, análisis fisicoquímicos y de materia orgánica indican que la calidad del agua está en el rango media-baja (López, 2009; CORPONARIÑO, 2011), validando los datos obtenidos con la metodología utilizada.

Tabla 6. Resultados Índice *Fuzzy* de calidad del agua.

Punto de muestreo	Parámetro	Unidad de medida	Valor	FWQ	Interpretación
Punto 1 - Marzo	OD	mg/L	5,7	55,8	Regular
	pH	-	7,5		
	SST	mg/L	12		
	CE	μ/cm	230		
	DQO	mg/L	87,5		
	EC ₅₀	% v/v	151,28		
Punto 1 - Mayo	OD	mg/L	3,2	49,5	Regular
	pH	-	7,2		
	SST	mg/L	18		
	CE	μ/cm	280		
	DQO	mg/L	125,6		
	EC ₅₀	% v/v	16,89		
Punto 2 - Marzo	OD	mg/L	4,3	49,5	Regular
	pH	-	7,3		
	SST	mg/L	15		
	CE	μ/cm	300		
	DQO	mg/L	100		
	EC ₅₀	% v/v	30,47		
Punto 2 - Mayo	OD	mg/L	1,8	49,5	Regular
	pH	-	7,4		
	SST	mg/L	18		
	CE	μ/cm	360		
	DQO	mg/L	78,6		
	EC ₅₀	%v/v	30,47		

En general, los parámetros de conductividad eléctrica y pH fueron los más estables en el desarrollo de esta metodología, pues sus valores en todos los puntos estudiados se mantuvieron en rangos aceptables en el tiempo. Sin embargo, valores bajos de Oxígeno Disuelto que denotan la alta carga microbiológica del cauce, en relación a altos valores de Demanda Química de Oxígeno son preocupantes para los procesos de conservación de las condiciones favorables dentro del ecosistema fluvial, todo lo que indica que se están desatando procesos intensos de mineralización de la materia orgánica en el punto 2, proveniente del punto 1 donde existen descargas significativas de aguas con alta cantidad de materia orgánica de gran complejidad (Rosero et al., 2011), que favorecen el consumo de oxígeno y los procesos de reducción del cromo (Arauzo et al., 2003).

Es importante resaltar, que el Río Pasto es un río de montaña lo cual debido a su condición de pendiente pronunciada y alta velocidad favorece, la sedimentación en las orillas y procesos de autodepuración que son de gran importancia para la rehabilitación del cuerpo de agua, evitando que la demanda de oxígeno se produzca en todo el cuerpo de agua (López et al., 2009).

Conclusiones

Dado que la respuesta de sensibilidad de *Lactuca sativa* con el Zn²⁺ fue un valor representativo con un buen nivel de confiabilidad respecto a otros estudios, se puede afirmar que el resultado del control positivo en el experimento, es un referente veraz que sirve para comparar y reafirmar el nivel de inhibición de las semillas dentro del bioensayo en las distintas concentraciones.

Las muestras de agua evaluadas del Río Pasto tienen un efecto toxicológico lo suficientemente nocivo para inhibir el desarrollo normal de *Lactuca sativa*, aunque se pueden presentar posibles procesos de sedimentación y menor movilidad de los metales pesados que pueden estimular procesos de hormesis. Es preciso, sin embargo, realizar bioensayos con técnicas más sensibles con dicha especie para reducir la incertidumbre en los resultados.

La metodología de Lógica Fuzzy es una herramienta de mucha utilidad a la hora de realizar juicios de calidad del agua a partir de múltiples variables, lo cual permite tener resultados que se adapten mejor a la realidad compleja de los ecosistemas fluviales.

Conflicto de intereses

Los autores declaran que no hay conflicto de intereses.

Referencias

- Arauzo, M.; Rivera, M.; Valladolid, M.; Noreña, C.; Cedenilla, O. Contaminación por cromo en el agua intersticial, en el agua del cauce y en los sedimentos del Río Jarama. **Limnética**, v. 22, n. 3/4, p. 85-98, 2003.
- Azario, R.; Salvarezza, S.; Ibarra, A.; García, M. Efecto del cromo hexavalente y trivalente sobre el crecimiento de *Escherichia coli*. **Información Tecnológica**, v. 21, n. 1, p. 51-56, 2010. <https://doi.org/10.4067/S0718-07642010000100009>
- Bichai, F.; Smeets, P. W. M. H. Using QMRA-based regulation as a water quality management tool in the water security challenge: Experience from the Netherlands and Australia. **Water Research**, v. 47, n. 20, p. 7315-7326, 2013. <https://doi.org/10.1016/j.watres.2013.09.062>
- Bohórquez-Echeverry, P.; Campos-Pinilla, C. Evaluación de *Lactuca sativa* y *Selenastrum capricornutum* como indicadores de toxicidad en aguas. **Universitas Scientiarum**, v. 12, n. 2, p. 83-98, 2007.
- Calvachi, G. L.; Martínez, M. L.; Chamorro, F. La planificación del Río Pasto. **Revista Unimar**, v. 52, n. 9, p. 35-56, 2009.
- Castillo, G. C.; Vila, I. C.; Neild, E. Ecotoxicity assessment of metals and wastewater using multitrophic assays. **Environmental Toxicology**, v. 15, n. 5, p. 370-375, 2000. [https://doi.org/10.1002/1522-7278\(2000\)15:5<370::AID-TOX3>3.0.CO;2-S](https://doi.org/10.1002/1522-7278(2000)15:5<370::AID-TOX3>3.0.CO;2-S)
- Castillo, G.; Schäfer, L. Evaluation of a bioassay battery for water toxicity: A Chilean experience. **Environmental Toxicology**, v. 15, p. 331-337, 2000. [https://doi.org/10.1002/1522-7278\(2000\)15:4<331::AID-TOX9>3.0.CO;2-E](https://doi.org/10.1002/1522-7278(2000)15:4<331::AID-TOX9>3.0.CO;2-E)
- Charles, J.; Sancey, B.; Morin-Crini, N.; Badot, P. M.; Degiorgi, F.; Trunfio, G.; Crini, G. Evaluation of the phytotoxicity of polycontaminated industrial effluents using the lettuce plant (*Lactuca sativa*) as a bioindicator. **Ecotoxicology and Environmental Safety**, v. 74, p. 2057-2064, 2011. <https://doi.org/10.1016/j.ecoenv.2011.07.025>
- Chau, K.-W. A review on integration of artificial intelligence into water quality modelling. **Marine Pollution Bulletin**, v. 52, n. 7, p. 726-733, 2006. <https://doi.org/10.1016/j.marpolbul.2006.04.003>
- CORPONARIÑO - Corporación Autónoma de Nariño. **Plan de ordenamiento del Río Pasto**. San Juan de Pasto: CORPONARIÑO, 2011.
- Di Paolo, C.; Ottermanns, R.; Keiter, S.; Ait-Aissa, S.; Bluhm, K.; Brack, W.; Breitholtz, M.; Buchinger, S.; Carere, M.; Chalon, C.; Cousin, X.; Dulio, V.; Escher, B.I.; Hamers, T.; Hilscherová, K.; Jarque, S.; Jonas, A.; Maillot-Marechal, E.; Marneffe, Y.; Nguyen, M.T.; Pandard, P.; Schifferli, A.; Schulze, T.; Seidensticker, S.; Seiler, T.-B.; Tang, J.; Van Der Oost, R.; Vermeirssen, E.; Zounková, R.; Zwart, N.; Hollert, H. Bioassay battery interlaboratory investigation of emerging contaminants in spiked water extracts: Towards the implementation of bioanalytical monitoring tools in water quality assessment and monitoring. **Water Research**, v. 104, p. 473-484, 2016. <https://doi.org/10.1016/j.watres.2016.08.018>
- Dutka, B. Introduction to bioassay testing: Environmental toxicology, sample storage and preservation, sample concentration and extraction. **Qual97**, p. 1-7, 1997.

- Dutka, B. Short-term root elongation toxicity bioassay. In: Dutka, B. (Ed.). **Methods for toxicological analysis of waters, wastewaters and sediments**. Canadá: National Water Research Institute, Environment Canada, 1989. p. 120-122.
- Fjällborg, B.; Li, B.; Nilsson, E.; Dave, G. Toxicity identification evaluation of five metals performed with two organisms (*Daphnia magna* and *Lactuca sativa*). **Archives of Environmental Contamination and Toxicology**, v. 50, n. 2, p. 196-204, 2006. <https://doi.org/10.1007/s00244-005-7017-6>
- Guan, Y.; Wang, X.; Wong, M.; Sun, G.; An, T.; Guo, J.; Zhang, G. Evaluation of genotoxic and mutagenic activity of organic extracts from drinking water sources. **PLoS ONE**, v. 12, n. 1, e0170454, 2017. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0170454>
- Islam, J.; Sarkar, M.; Rahman, A.K.; Ahmed, K.S. Quantitative assessment of toxicity in the Shitalakkhya River, Bangladesh. **The Egyptian Journal of Aquatic Research**, v. 41, n. 1, p. 25-30, 2015. <https://doi.org/10.1016/j.ejar.2015.02.002>
- Kamal, M. M.; Malmgren-Hansen, A.; Badruzzaman, A. B. Assessment of pollution of the River Buriganga, Bangladesh using a water quality model. **Water Science and Technology**, v. 40, n. 2, p. 129-136, 1999. [https://doi.org/10.1016/S0273-1223\(99\)00474-6](https://doi.org/10.1016/S0273-1223(99)00474-6)
- Kong, I. C. Joint effects of heavy metal binary mixtures on seed germination, root and shoot growth, bacterial bioluminescence, and gene mutation. **Journal of Environmental Sciences**, v. 25, n. 5, p. 889-894, 2013. [https://doi.org/10.1016/S1001-0742\(12\)60174-0](https://doi.org/10.1016/S1001-0742(12)60174-0)
- Lessels, J.; Bishop, T.F. Estimating water quality using linear mixed models with stream discharge and turbidity. **Journal of Hydrology**, v. 498, p. 13-22, 2013. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2013.06.006>
- Li, G. Y. **Intelligent control and Matlab**. Beijing: Publishing House of Electronics Industry, 2006.
- Li, R.; Zou, Z.; An, Y. Water quality assessment in Qu River based on fuzzy water pollution index method. **Journal of Environmental Sciences**, v. 50, n. 12, p. 87-92, 2016. <https://doi.org/10.1016/j.jes.2016.03.030>
- López, M. L. Determinación de la calidad del agua del Río Pasto mediante la utilización de bioindicadores. **Revista Unimar**, v. 52, n. 9, p. 35-56, 2009.
- López, M.; Galindo, D.; Romo, G. Determinación de la constante de desoxigenación por demanda béntica en el Río Pasto. **Revista Criterios**, v. 23, n. 1, p. 54-73, 2009.
- Lyu, J.; Park, J.; Kumar-Pandey, L.; Choi, S.; Lee, H.; De Saeger, J.; Depuydt, S.; Han, T. Testing the toxicity of metals, phenol, effluents, and receiving waters by root elongation in *Lactuca sativa* L. **Ecotoxicology and Environmental Safety**, v. 149, p. 225-232, 2018. <https://doi.org/10.1016/j.ecoenv.2017.11.006>
- Narváez, Y.; Paz, W.; Guapucal, M.; Leonel, H. Evaluación de procesos institucionales en el pago por servicios ambientales, Cuenca Alta del Río Pasto. **Revista de Ciencias Agrícolas**, v. 33, n. 1, p. 64-72, 2016. <https://doi.org/10.22267/rcia>
- Ocampo-Duque, W. A. **On the development of decision-making systems based on fuzzy models to assess water quality in rivers**. Tarragona, España: Universitat Rovira i Virgili, 2009. (PhD Thesis).
- Ocampo-Duque, W.; Ferré-Huguet, N.; Domingo, J. L.; Schuhmacher, M. Assessing water quality in rivers with fuzzy inference systems: A case study. **Environment International**, v. 32, n. 6, p. 733-742, 2006. <https://doi.org/10.1016/j.envint.2006.03.009>
- Ronco, A.; Rossini, G. B.; Sobrero, C.; Apartin, C.; Castillo, G.; Diaz-Baez, M. C.; Ramirez, A. E.; Ahumada, I.; Mendoza, J. The application of hazard assessment schemes using the watertox toxicity testing battery. In: Blaise, C.; Féraud, J. (Eds.). **Small-scale freshwater toxicity investigations: Volume 2 - Hazard assessment schemes**. Netherlands: Springer, 2005. p. 233-255. <https://doi.org/10.1007/1-4020-3553-5>
- Rosero, M.; Nerín, C.; Taborda, G.; Rodríguez, G. Caracterización química de la materia orgánica natural del Río Pasto. **Revista de la Academia Colombiana de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales**, v. 35, n. 136, p. 363-369, 2011.
- Seguí, X.; Pujolasus, E.; Betrò, S.; Agueda, A.; Casal, J.; Ocampo-Duque, W.; Rudolph, I.; Barra, R.; Páez, M.; Barón, E.; Eljarrat, E.; Barceló, D.; Darbra, R. M. Fuzzy model for risk

assessment of persistent organic pollutants in aquatic ecosystems. **Environmental Pollution**, v. 178, p. 23-32, 2013. <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2013.02.014>

Serpa, D.; Keizer, J. J.; Cassidy, J.; Cuco, A.; Silva, V.; Gonçalves, F.; Cerqueira, M.; Abrantes, N. Assessment of river water quality using an integrated physicochemical, biological and ecotoxicological approach. **Environmental Science: Processes & Impacts**, v. 16, n. 6, p. 1434-1444, 2014. <https://doi.org/10.1039/C3EM00488K>

Thomas, J. M.; Skalski, J. R.; Cline, J. F.; McShane, M. C.; Simpson, J. C. Characterization of chemical waste site contamination and determination of its extent using bioassays. **Environmental Toxicology and Chemical**, v. 5, p. 487-501, 1986. <https://doi.org/10.1002/etc.5620050508>

USEPA - US Environmental Protection Agency. Ecological effects test guidelines. Seed germination/root elongation toxicity test. OPPTS 850.4200. 1996.

Wang, Y.; Wilson, J. M.; Vanbriesen, J. M. The effect of sampling strategies on assessment of water quality criteria attainment. **Journal of Environmental Management**, v. 154, p. 33-39, 2015. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2015.02.019>

Watanabe, C. H.; Monteiro, A. S. C.; Gontijo, E. S. J.; Lira, V. S.; Bueno, C. D. C.; Kumar, N. T.; Fracacio, R.; Rosa, A. H. Toxicity assessment of arsenic and cobalt in the presence of aquatic humic substances of different molecular sizes. **Ecotoxicology and Environmental Safety**, v. 139, p. 1-8, 2017. <https://doi.org/10.1016/j.ecoenv.2017.01.018>

Wong, H.; Hu, B. Q. Application of improved extension evaluation method to water quality evaluation. **Journal of Hydrology**, v. 509, p. 539-548, 2014. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2013.12.003>



Información de la licencia: Este es un artículo Open Access distribuido bajo los términos de la licencia Creative Commons Attribution, que permite uso irrestricto, distribución y reproducción en cualquier medio, siempre y cuando la obra original sea debidamente citada.