

Revisión sistemática de técnicas no convencionales para la evaluación de la calidad del agua de ríos contaminados con plaguicidas¹

Systematic review on unconventional techniques for the evaluation of water quality in rivers contaminated with pesticides

Revisão sistemática de técnicas não convencionais para a avaliação da qualidade da água de rios contaminada com pesticidas.

M.A. Jurado e I.D. Mercado

Recibido: marzo 10 de 2016 - Aceptado: enero 13 de 2017

Resumen— Se llevó a cabo una revisión sistemática de técnicas no convencionales de evaluación de la calidad del agua de ríos contaminados con plaguicidas. Específicamente, se examinaron estudios en los que se considera el estado ecológico y químico de las corrientes, mediante el análisis de múltiples parámetros en muestras de agua, sedimentos y agua inter-poro. La revisión permite inferir que posiblemente estas técnicas son adecuadas para valorar de manera confiable y con menor grado de subjetividad la complejidad de la contaminación de las corrientes superficiales y revela oportunidades para adaptar las técnicas a los contextos locales.

Palabras clave— calidad del agua, eco toxicología, plaguicidas, ríos.

Abstract— A systematic review about non-conventional evaluation techniques of water quality in rivers contaminated with pesticides was conducted. Some studies carried out of the ecological and chemical state of rivers were evaluated by analyzing multiple parameters in samples of water, sediment and water inter-pore. Likely those methodologies being ideal for establishing complexity of pollution in rivers with less degree of uncertainty and imprecision. Finally, the review

reveals opportunities to adapt the methodologies to the local contexts.

Key words— water quality, ecotoxicology, pesticides, rivers.

Resumo— Foi feita uma revisão sistemática de técnicas não convencionais de avaliação da qualidade da água de rios contaminados com pesticidas. Especificamente, foram examinados estudos onde se considera o estado ecológico e químico das correntes, através da análise de múltiplos parâmetros em amostras de água, sedimentos e água inter-poro. A revisão permite deduzir que possivelmente estas técnicas são adequadas para avaliar de maneira confiável e com menor grau de subjetividade a complexidade da contaminação das correntes superficiais e revela oportunidades para adaptar as técnicas aos contextos locais.

Palavras chave— qualidade da água, eco toxicologia, pesticidas, rios.

I. INTRODUCCIÓN

DE la calidad del agua de los recursos hídricos depende el bienestar social y el desarrollo económico tanto de las actuales, como de las futuras generaciones [1], [2] así como el equilibrio de los sistemas ecológicos; el control alimentario; las actividades agropecuarias; los servicios ambientales y el control de la contaminación, entre otros asuntos fundamentales [3]–[5].

A pesar de esto, los usos del agua constantemente amenazan su calidad. Se sabe que esta presión proviene de diversas fuentes, hasta el punto que los sistemas naturales no

¹Producto derivado del proyecto de investigación profesoral “Evaluación de la calidad del agua del Río Pasto en la cuenca alta, utilizando una metodología no convencional basada en la evaluación de riesgo ambiental”. Presentado al Grupo de Investigación Ambiental (GIA) de la Facultad de Ingeniería de la Universidad Mariana.

M.A. Jurado, Magíster en Ingeniería Sanitaria y Ambiental, Docente de la Universidad Mariana, Pasto (Colombia); email: majuradoe@umariana.edu.co.

I.D. Mercado, Magíster en Ingeniería Ambiental, Docente Universidad del Atlántico, Barranquilla (Colombia), email: ivanmercado@mail.uniatlantico.edu.co

pueden asimilar las descargas contaminantes [6]–[10]. En consecuencia, en la actualidad, se hace necesario implementar técnicas que faciliten evaluar la calidad del agua de los recursos hídricos de forma confiable y con el menor grado de subjetividad posible [11]–[13].

A este respecto, y como sugieren algunas investigaciones, hoy en día la Evaluación de la Calidad del Agua (ECA) de los recursos hídricos obedece a interpretaciones subjetivas, con un innegable nivel de incertidumbre [1], [14]–[16].

Por ejemplo, algunas veces se analizan de manera empírica algunos parámetros fisicoquímicos de calidad de agua o se señala la naturaleza tóxica de ciertos contaminantes individuales y se compara su concentración contra estándares legales, pero no siempre se considera la complejidad de sus mezclas en el ambiente y/o los efectos de estas sobre los ecosistemas o la salud humana [17]–[19].

Tal es el caso de la ECA de corrientes superficiales en los países como Colombia donde habitualmente se miden un conjunto de parámetros fisicoquímicos críticos y la concentración de ciertos xenobióticos en la masa de agua, pero no sus efectos sobre los seres vivos o éstos se evalúan por separado [20], [21].

Además, no siempre se incluyen otras matrices ambientales como los sedimentos, que albergan organismos críticos para los ciclos naturales y que acumulan sustancias contaminantes con el paso del tiempo, ya que su concentración en el agua es más variable y dinámica [1], [22], [23]. En el marco de las consideraciones anteriores, se hace evidente la necesidad de utilizar metodologías de ECA cada vez más robustas con el fin de incluir dichas cuestiones [1], [17], [24].

Así pues, se debería considerar, por ejemplo: (1) la multiplicidad de parámetros de calidad de agua; (2) las complejas interacciones en el ambiente de los xenobióticos; (3) los posibles efectos adversos de éstos sobre los sistemas vivos y (4) la subjetividad lingüística y la incertidumbre [25]–[28].

Con respecto a esto último, como lo sugiere la literatura técnica: “La subjetividad lingüística está relacionada con la interpretación o percepción, asociada a los usos del agua. Así por ejemplo, si una fuente contiene “elevada” concentración de nitratos, es probable que se considere como “mala” para el consumo humano, pero podría ser una fuente adecuada para el riego” [29]. En efecto, algunas de las fuentes de incertidumbre se pueden cuantificar, a otras se les debe dar un tratamiento cualitativo, pero siempre se deberían considerar [30].

En la ECA, algunas fuentes de incertidumbre pueden ser por ejemplo: (1) la calidad de los datos y la frecuencia de muestreo; (2) la exclusión de sustancias de la lista de tóxicos a considerar en el estudio o (3) la eliminación de rutas de exposición [29], [30].

Ante la situación planteada, se puede señalar que la contaminación de las aguas superficiales puede ocurrir de diversas maneras, de las cuales la contaminación por Compuestos Orgánicos Persistentes (COP's), requiere mucha atención por sus impactos sobre los sistemas vivos y en especial sobre la salud humana [31]–[36].

Entre tales compuestos, se encuentran los *plaguicidas*.

Éstos pueden transportarse en las masas de agua o sorberse en los suelos de rivera y en los sedimentos, facilitando su movilidad hacia las aguas superficiales y subterráneas. Al mismo tiempo, sus mezclas o metabolitos, tienen la capacidad de ser persistentes en el ambiente. Por ejemplo, pueden franquear los sistemas convencionales de potabilización de agua [24], [37], [38].

En torno a esto, se han introducido diferentes estrategias de biomonitorio, por ejemplo: biosensores y bioensayos como herramientas complementarias a las variables fisicoquímicas y a las mediciones de concentración. Éstos involucran organismos de diferentes grupos taxonómicos y niveles tróficos. Entre ellos, bacterias, nematodos, crustáceos, algas, peces y mamíferos, debido a la complejidad del entorno natural y a la necesidad de establecer relaciones causa/efecto entre la concentración de los contaminantes y los daños ambientales generados [28], [39]–[42].

Por otra parte, dada la importancia del agua como recurso ambiental, bien social y económico de la humanidad, desde hace bastante tiempo, el tema del diagnóstico y control de la contaminación de los recursos hídricos, se ha venido regulando a través de diferentes instrumentos tales como, modernas políticas de comando y control para su protección, tanto a nivel local o nacional, como a nivel global. Así mismo, a través de tratados y convenios internacionales para el control de la contaminación y el vertimiento de sustancias contaminantes, especialmente a través del manejo responsable de los recursos naturales y del desarrollo sostenible [43].

En este contexto, la normatividad asociada a la protección del recurso hídrico en Colombia, se ha venido endureciendo desde hace varios años, especialmente desde la constitución de 1991. Tal es el caso de la resolución 0631 de 2015 (en el marco del decreto 1076 de 2015), en que se establecen estándares legales asociados al vertimiento de los residuos líquidos a los cuerpos de agua superficiales entre otras disposiciones (considerada en el marco de una política de comando y control). Al respecto, se puede mencionar que en el capítulo IV, artículo 7, por ejemplo, se tienen en cuenta límites o estándares para el vertimiento de ingredientes activos de pesticidas que se liberen al ambiente.

Ahora bien, el panorama a nivel mundial en lo relacionado con dicho asunto, involucra herramientas cada vez más robustas que inclusive requieren establecer los riesgos asociados a sustancias tóxicas liberadas al ambiente (en especial a los recursos hídricos). Tal es el caso, de la *Directiva Marco del Agua Europea*, como referente de integración de toda la legislación relacionada con el agua.

Para ser más específicos, las regulaciones a nivel mundial inclusive requieren herramientas concretas para monitorear los efectos tóxicos de los contaminantes liberados al ambiente. Solo por dar un ejemplo se nombran, el reglamento (EC) No. 440/2008 y *guidance document on application and interpretation of single-species tests in environmental toxicology*. EPS 1/RM/34 de Canadá.

Es preciso además, reconocer que, en relación con la ECA de corrientes superficiales, específicamente impactadas por plaguicidas, a nivel global, se han estudiado

varias clases de compuestos. Entre ellos, organoclorados, organofosforados, triazinas, cloroacetanilidas, piretroides, carbamatos, ftalimidias, y otros pesticidas, herbicidas y fungicidas. Entre ellos, desde hace bastantes años en los estudios se incluyen: *alaclor*, *atrazina*, *clorfenvinfos*, *clorpirifos*, *aldrin*, *endrin*, *diendrin*, *isodrin*, *DDT*, *diuron*, *endosulfan*, *hexacolorobenceno*, *hexaclorobutadieno*, *hexaclorociclohexano*, *pentaclorofenol*, *heptaclor*, *clordane*, *metoxicloro*, *clorofenil*, *diclorvos*, *carbofuran*, *diazinon*, *metil paration*, entre otros [44]–[46].

Ante el escenario planteado, el principal objetivo de este trabajo fue llevar a cabo una revisión sistemática en cuanto a información y actualidad científica de estudios en los que se apliquen procedimientos poco comunes de ECA de corrientes superficiales contaminadas con plaguicidas o “no convencionales”. Es decir, se tuvieron en cuenta aquellos estudios que abarcan el estado ecológico y químico de la matriz agua/sedimentos y en los que se considera importante el análisis de la incertidumbre y/o la interpretación de los datos. Todo esto con el fin de explorar la hipótesis de que estas técnicas permiten valorar de manera confiable y con menor grado de subjetividad la complejidad de la contaminación de las corrientes superficiales.

II. METODOLOGÍA

Para el desarrollo de este trabajo, se llevó a cabo una búsqueda de literatura científica relevante, utilizando como bases de datos: *ScienceDirect* (www.sciencedirect.com) y *Scielo* (www.scielo.org.co), esto se debió principalmente a la posibilidad de acceso a éstas. Al mismo tiempo, éstas incluyen trabajos a nivel local e internacional. Para llevar a cabo la búsqueda en las bases de datos, se utilizaron como criterios de exploración, los siguientes: (1) que idioma del documento fuera inglés o español; (2) se utilizaron las siguientes palabras clave: *ecotoxicity*, *water quality*, *pesticides and rivers*; *ecotoxicología*, *calidad del agua*, *plaguicidas y ríos*; (3) se consideraron artículos, *reviews* o resúmenes de ponencias, en los que las palabras clave se encontrarán en el título o en el resumen y (4) se restringió la búsqueda a documentos de los últimos 5 años.

Así mismo, los siguientes ítems guiaron la selección de los documentos que cumplieron con el objeto de estudio:

(1) El objeto de interés se dividió en cuatro criterios de selección y a cada uno se le asignó un valor de relevancia (puntaje), como se muestra en la tabla I; (2) Se preseleccionaron documentos que contienen los criterios de interés, adquiriéndose en su totalidad para su revisión a fondo por los autores y su posterior asignación por promedio aritmético simple del puntaje total, como se muestra en la tabla II y (3) Finalmente, se adoptó de la literatura técnica [47], un sistema para identificar las áreas que pudieran ofrecer oportunidades de investigación o vacíos posiblemente no abordados por la literatura científica.

En este orden de ideas, los estudios se valoraron de 0 a 5. Para el análisis y discusión, se seleccionaron los documentos que obtuvieron puntajes entre 4 y 5, pues se consideró que cumplen concretamente con el objeto de estudio.

Finalmente, se llevaron a cabo los siguientes pasos

para identificar las áreas que ofrecen oportunidades de investigación o vacíos no abordados por la literatura. Esto último con base en lo propuesto por Gómez et al., en su trabajo sobre revisión sistemática de sistemas eólicos para micro-generación [47]:

(1) Se calculó el porcentaje de artículos que responden a cada una de las preguntas o criterios de selección, utilizando la ecuación 1; (2) se calculó el promedio de los porcentajes utilizando la ecuación 2 y (3) finalmente, se dividió el promedio de los porcentajes entre 3, con el fin de obtener un porcentaje de quiebre, mínimo o límite, utilizando la ecuación 3.

$$PAA\%(n) = \left(\frac{T}{TA} \right) \cdot 100 \quad (1)$$

donde PAA% es el porcentaje de artículos preseleccionados que responden al criterio de selección n-simo.

T es el total de artículos preseleccionados que responden al criterio de selección n-simo.

TA es el total de artículos preseleccionados.

n es el número de criterio de selección (1,2, 3 o 4).

TABLA I.
CRITERIOS DE SELECCIÓN

Criterio No.	Descripción	Puntaje Máximo
1	Se lleva a cabo un estudio de la calidad del agua de un río o un tramo del mismo, utilizándose para ello metodologías “no convencionales”, cuya reflexión se fundamenta en los plaguicidas y sus riesgos ecotoxicológicos como contaminantes objetivo. O se tienen en cuenta otros compuestos tóxicos (metales u otros COPs) *	1
2	En el estudio se tienen en cuenta muestras de agua, sedimentos y/o agua inter-poro.	1
3	En el estudio se tienen en cuenta uno o más bioensayos diferentes, se determina la concentración química y/o el tipo de plaguicidas u otros compuestos. Se llevan a cabo biomonitoreos, análisis de riesgos y/o se implementa o se determina algún índice de calidad nuevo o novedoso.	1.5
4	En el estudio el análisis de los datos y/o de la incertidumbre se lleva a cabo a través de herramientas matemáticas o estadísticas robustas, nuevas o novedosas.	1.5

*Se acepta por ser las técnicas de ECA uno de los principales intereses de revisión.

TABLA II.
DOCUMENTOS PRESELECCIONADOS Y PUNTAJE ASIGNADO

Referencia	Criterio No.				Puntaje Total
	1	2	3	4	
	[1]	0.5	0.5	1	
[13]	0.5	1	1.5	1	4.0
[15]	0	1	0	0	1.0
[18]	0.5	1	1	0	2.5
[19]	1	1	1	0	3.0
[24]	0.7	1	0	0	1.7
[20]	1	1	1	0	3.0
[23]	1	1	0.5	0	2.5
[48]	0	1	0	0	1
[49]	0	1	0	0	1.0
[50]	0	0.3	0	0.5	0.8
[51]	0.5	1	0.5	0	2.0
[52]	0	1	0	0	1.0
[53]	1	1	1	1	4.0
[54]	1	1	1	0	3.0
[55]	1	1	1	0	3.0
[56]	1	1	1	1	4.0
[57]	0.5	0	0	0.5	1.0
[58]	1	1	1	0	3.0
[59]	1	1	0	0	2.0
[60]	1	1	1	0	3.0
[61]	0	1	0.5	0	1.5
[62]	0	1	1	0	2.0
[63]	0	1	0.5	0	1.5
[64]	0.5	1	0.5	1.5	2.5
[65]	0.5	0.5	1.5	1.5	4.0
Total de Artículos Preseleccionados					26

$$APPA\% = \frac{PPA\%(1) + PPA\%(2) + \dots + PPA\%(n)}{TC} \quad (2)$$

donde APPA% es el promedio de porcentajes de preguntas o criterios de selección.

PPA%(n): Porcentaje de artículos que responden a las preguntas o criterio de sección n-simo.

TC: Total de preguntas o criterios de selección.

$$MAPAA\% = \frac{APPA\%}{3} \quad (3)$$

donde MAPAA% es el porcentaje de quiebre, mínimo o límite.

APPA% es el promedio de porcentajes de preguntas o criterios de selección.

III. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

La búsqueda arrojó 52 documentos, de los cuales, como se observa en la tabla II, se preseleccionaron 26. Cinco de ellos, cumplieron con los requisitos mínimos y fueron los que se utilizaron en el análisis y discusión. Por otra parte, en la tabla III, se presentan los indicadores calculados, con el fin de identificar las oportunidades de investigación o vacíos. A este respecto, según Gómez et al. [47], si algún valor del porcentaje de artículos preseleccionados (PAA%) es menor que el valor del porcentaje de quiebre (MAPAA%), se revela una oportunidad de investigación no abordada por la literatura científica.

TABLA III.
INDICADORES CALCULADOS PARA LA IDENTIFICACIÓN DE VACÍOS U OPORTUNIDADES DE INVESTIGACIÓN

Indicador	Valor calculado			
PAA%	C1: 69%	C2: 96%	C3: 69%	C4: 31%
APPA%	66%			
MAPAA%	22%			

C. Señala el criterio de selección de la tabla I.

Con base en los resultados presentados en la tabla III, se puede inferir que posiblemente no existan vacíos con respecto a las cuestiones aquí planteadas o asuntos no abordados por la literatura técnica.

Por otra parte, con base en los valores obtenidos del porcentaje de artículos preseleccionados (PAA%), se puede inferir que la discusión con respecto a las metodologías de ECA de corrientes superficiales contaminadas con plaguicidas que involucran un análisis del estado ecológico y químico, desde una perspectiva no convencional, ha sido una cuestión de creciente interés en los últimos 5 años, a pesar de que el tema de los riesgos por exposición a este tipo de sustancias o sus metabolitos ha sido estudiado ampliamente desde el punto de vista biológico y químico [66]–[68].

Es decir, la ECA de corrientes superficiales y los riesgos para la salud humana y los ecosistemas, usando muestras de agua, sedimento y agua-interporo; bioensayos; mediciones químicas e índices de calidad y herramientas de análisis de datos e incertidumbre, alcanzará mayor atención en los próximos años, puesto que en casi todos los casos el valor del porcentaje de artículos preseleccionados (PAA%) supera el 50%.

No obstante, el porcentaje de artículos preseleccionados (PAA%) del criterio No. 4, presenta el valor más bajo de todos, lo que señala que posiblemente haya oportunidades para incorporar o estimular el análisis de datos y de incertidumbre en las actuales y las futuras evaluaciones, especialmente a nivel local. Esto último sugiere la necesidad de minimizar la subjetividad al momento de comunicar los resultados, lo que podría contribuir en temas de gestión del recurso.

En suma, analizando los documentos más relevantes, se puede inferir que las metodologías más robustas para la ECA de corrientes superficiales contaminadas con plaguicidas, metales u otros COPs, comúnmente contemplan

la recolección y análisis de muestras de agua, sedimento y/o agua-interporo, considerando relevante las frecuencias de muestreo y la inclusión de múltiples parámetros físicos, químicos y biológicos de calidad del agua y diferentes tipos de ensayos ecotoxicológicos (entre ellos diferentes tipos de bioensayos). Así como, la inclusión de técnicas matemáticas robustas, nuevas o novedosas para el análisis de datos y de la subjetividad [1], [13], [15], [53], [56], [65].

Vale la pena mencionar que la relevancia del asunto del muestreo de sedimentos se debe principalmente a que los plaguicidas tienen la capacidad de sorberse en los suelos de rivera y en los sedimentos, amén de otros factores asociados a su forma de aplicación y permanencia en las zonas de aplicación y a las condiciones climáticas, lo que facilita su movilidad en el ambiente [13], [46], [48].

Con base en la literatura seleccionada, los ensayos ecotoxicológicos, pueden ayudar a obtener una mejor representación de los efectos sobre los ecosistemas y la salud humana por exposición a diferentes tipos de plaguicidas, ya que la evaluación del estado químico es capaz de identificar la fuente o concentración de las sustancias y sus metabolitos, pero no suministra información de los efectos de los contaminantes sobre los sistemas vivos, el de sus mezclas en el ambiente o sus efectos sinérgicos y antagónicos. En consecuencia, el estado ecológico no siempre es coherente con el estado químico [13].

De esta manera, los investigadores comúnmente recomiendan integrar datos hidromorfológicos, químicos, físico-químicos, biológicos y ecotoxicológicos, para estimar mejor el estado ecológico de los sistemas lóticos y los riesgos por exposición [13], [53].

En las metodologías más robustas, las muestras se recolectan, normalmente, cerca de áreas urbanas, industriales y agrícolas o incluyen puntos en zonas de baja presión por estresores ambientales, siguiendo las recomendaciones técnicas para la recolección, almacenamiento y transporte de las muestras hasta el laboratorio, las cuales normalmente son adoptadas de la literatura técnica, de acuerdo al análisis requerido (bioensayos o determinaciones de concentración, en agua, sedimento o agua inter-poro), además típicamente tal información se puede complementar con información del estado biológico e hidromorfológico, obtenida de fuentes secundarias [1], [13].

El estado ecológico y químico, de las muestras, en las metodologías más robustas, se evalúa utilizando índices de calidad nuevos o novedosos, o los establecidos por la literatura técnica o por autoridades locales o nacionales. Así mismo, algunas investigaciones de las seleccionadas, tienen en cuenta los estándares o límites de concentración de los compuestos de interés establecidos por acuerdo internacional. Posteriormente, se relaciona la respuesta de uno o más bioensayos, con los índices de calidad, los parámetros fisicoquímicos y la concentración de sustancias de interés, en agua, agua inter-poro y/o sedimentos, a través de herramientas matemáticas para tratar la subjetividad, imprecisión, incertidumbre, vaguedad o variabilidad, tales como el análisis de componentes principales, correlación, la lógica difusa o las redes neuronales [13], [53], [56], [65].

La ambigüedad, siempre está presente en todos los procesos reales, esta puede surgir de la interpretación imprecisa del razonamiento humano. En este orden de ideas, vale la pena mencionar una de las herramientas matemáticas, que más llama la atención y que se deriva de la revisión de la literatura seleccionada. Este es el caso de lógica difusa, que se puede aplicar a procesos de toma de decisiones complejos, proporcionado fuerza matemática para la emulación de ciertos atributos perceptuales y lingüísticos asociados a la cognición humana [1], [29], [65].

En este contexto, afirmaciones como “el ecosistema acuático del río tiene alto riesgo debido al alto número de descargas de aguas residuales” o similares, se usan comúnmente en los reportes de ECA, revelando percepción e interpretación subjetiva sobre los resultados. Es decir, la percepción de la calidad del agua derivada del análisis ecológico y químico, normalmente está impregnada de conceptos que no tienen límites claramente definidos (difusividad), por ejemplo: “bajo”, “alto” o “medio riesgo”, y es mediante operaciones más robustas como por ejemplo a través de la lógica difusa en extensión de la lógica clásica (falso o verdadero), que ha sido posible obtener interpretaciones menos subjetivas y más confiables, tratando la difusividad de manera cuantitativa [1], [29], [65].

Finalmente, dada la diversidad y complejidad de herramientas o metodología de ECA; en la figura 1, se presenta de forma resumida las generalidades de aquellas utilizadas en los documentos que guiaron la discusión de acuerdo a la revisión sistemática propuesta. Además, permite ver las diferencias entre unas y otras, de acuerdo a los aportes de los diferentes autores. Al mismo tiempo, en la figura 2 se presenta un diagrama de flujo que intenta proponer de manera global la estructura ideal de tales herramientas.

IV. CONCLUSIONES

Los objetivos de la calidad ambiental del agua se definen teniendo en cuenta la capacidad de los cuerpos de agua de mantener sus procesos naturales de autodepuración, así como su capacidad para sustentar la fauna y la vegetación. Sin embargo, la contaminación química por plaguicidas de las aguas superficiales puede ser una amenaza para el ambiente acuático con efectos tales como toxicidad crónica o aguda de los organismos acuáticos, su acumulación en los ecosistemas, pérdidas de hábitats y biodiversidad, amenazas potenciales a la salud humana y a los procesos de autodepuración.

La revisión sistemática de literatura asociada a técnicas “no convencionales” para la ECA de corrientes superficiales contaminadas con plaguicidas, comúnmente contemplan la recolección y análisis de muestras de agua, sedimento y/o agua-interporo, múltiples parámetros fisicoquímicos y biológicos, ensayos ecotoxicológicos (entre ellos diferentes tipos de bioensayos), la medición de la concentración química de diferentes plaguicidas, el cálculo de índices de calidad nuevos o novedosos y la inclusión de técnicas matemáticas robustas para el análisis de la multiplicidad de datos y de la subjetividad, imprecisión, incertidumbre y la variabilidad.

Además, se revelan oportunidades para adaptar estas

herramientas al contexto local, considerando en cada caso particular, límites de tiempo y costo, especialmente en lo relativo a frecuencia de muestreo, bioensayos y al análisis de parámetros químicos, fisicoquímicos y biológicos. Además, aunque no se encontraron vacíos en la literatura técnica, la revisión sugiere avances y tendencias de desarrollo en las técnicas de ECA en los últimos años.

Al respecto, se resalta el uso del análisis de la subjetividad

lingüística frente a la simple correlación de datos o al análisis cualitativo, a través de técnicas como la lógica difusa. Esto permitirá comunicar los resultados de manera más objetiva y posiblemente pueda contribuir a la gestión de los recursos hídricos a nivel local.

Con base en la revisión se puede inferir que posiblemente estas técnicas permiten valorar de manera confiable y con menor grado de subjetividad la complejidad de la contaminación de las corrientes superficiales.

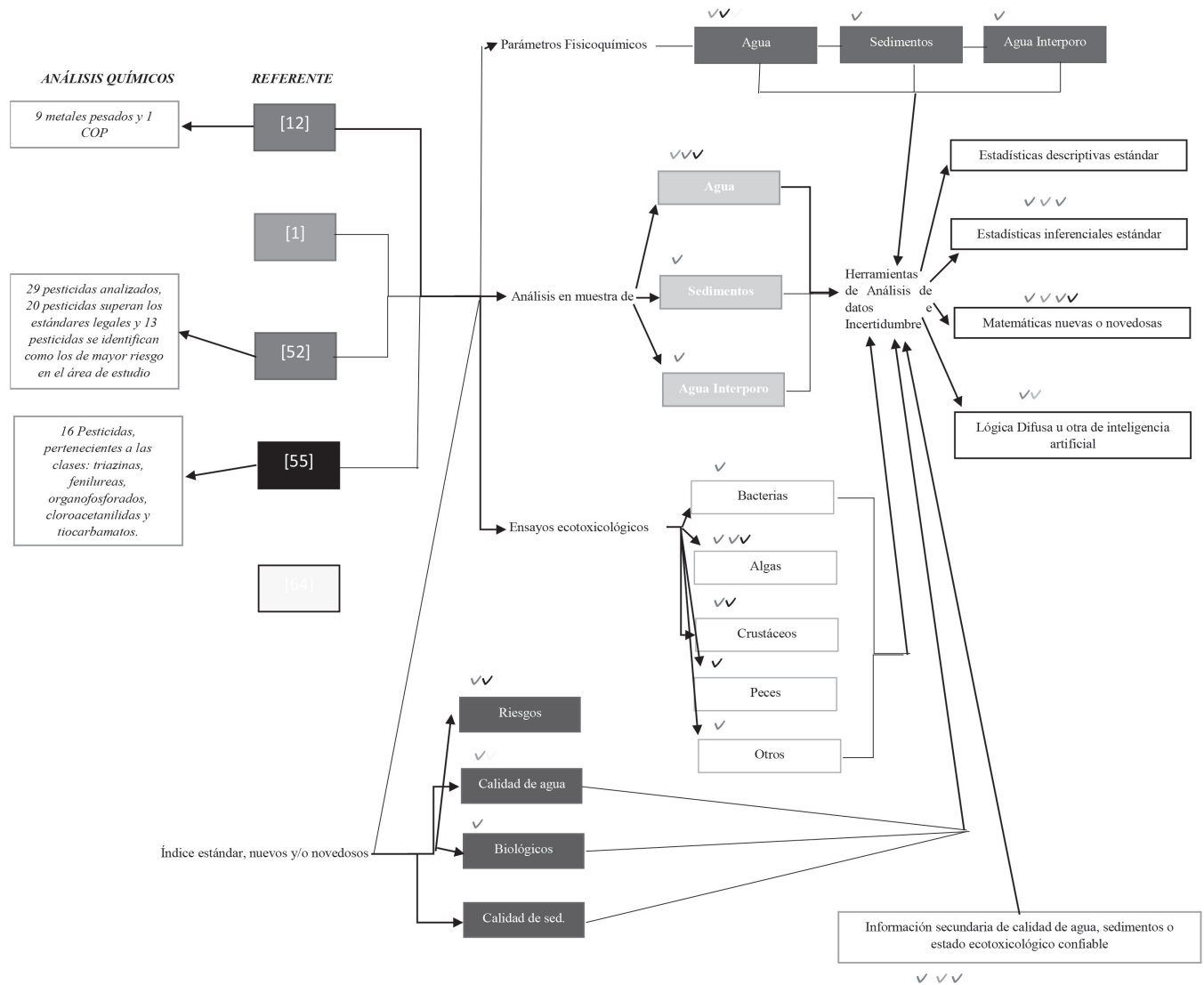
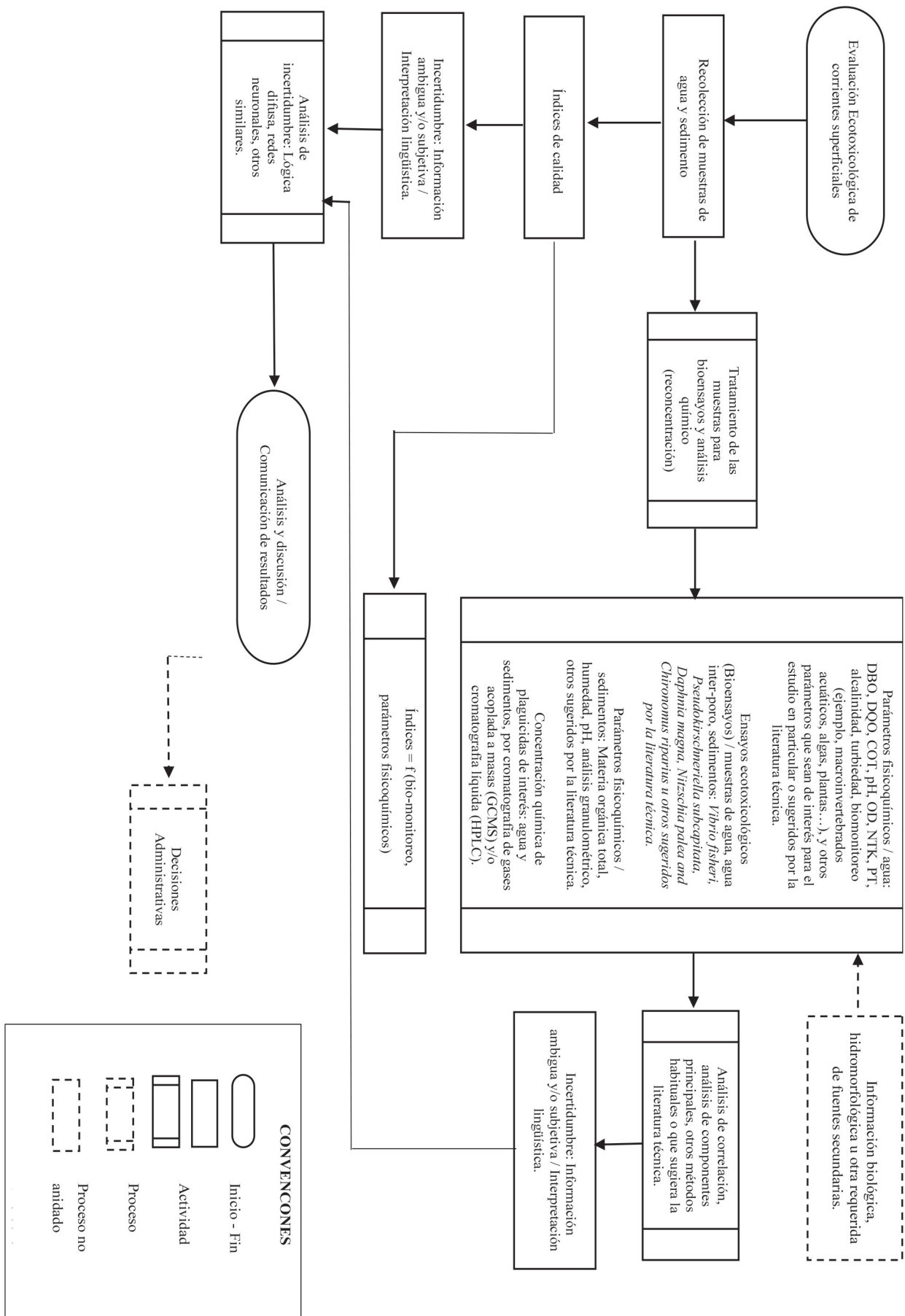


Fig 1. Comparación entre técnicas de ECA de corrientes superficiales de estudios seleccionados.

Fig. 2 Diagrama de flujo de ECA de corrientes superficiales no convencional.



REFERENCIAS

- [1] W. Ocampo-Duque, C. Osorio, C. Piamba, M. Schuhmacher, and J. L. Domingo, "Water quality analysis in rivers with non-parametric probability distributions and fuzzy inference systems: application to the Cauca River, Colombia," *Environ. Int.*, vol. 52, pp. 17–28, Feb. 2013.
- [2] Y. Wang *et al.*, "Assessment of surface water quality via multivariate statistical techniques: A case study of the Songhua River Harbin region, China," *J. Hydro-environment Res.*, vol. 7, no. 1, pp. 30–40, Mar. 2013.
- [3] P. R. Pawar, "Monitoring of impact of anthropogenic inputs on water quality of mangrove ecosystem of Uran, Navi Mumbai, west coast of India," *Mar. Pollut. Bull.*, vol. 75, no. 1–2, pp. 291–300, Oct. 2013.
- [4] T. O. Randhir and P. Ekness, "Water quality change and habitat potential in riparian ecosystems," *Ecohydrol. Hydrobiol.*, vol. 13, no. 3, pp. 192–200, Jan. 2013.
- [5] S. Gyawali, K. Techato, C. Yuangyai, and C. Musikavong, "Assessment of Relationship between Land uses of Riparian Zone and Water Quality of River for Sustainable Development of River Basin, A Case Study of U-Tapao River Basin, Thailand," *Procedia Environ. Sci.*, vol. 17, pp. 291–297, 2013.
- [6] Y. Hu and H. Cheng, "Water pollution during China's industrial transition," *Environ. Dev.*, vol. 8, pp. 57–73, Oct. 2013.
- [7] Y. Wu and J. Chen, "Investigating the effects of point source and nonpoint source pollution on the water quality of the East River (Dongjiang) in South China," *Ecol. Indic.*, vol. 32, pp. 294–304, Sep. 2013.
- [8] A. G. Gómez, J. A. Juanes, B. Ondiviela, and J. A. Revilla, "Assessment of susceptibility to pollution in littoral waters using the concept of recovery time," *Mar. Pollut. Bull.*, vol. 81, no. 1, pp. 140–8, May 2014.
- [9] J. Jiang, A. Sharma, B. Sivakumar, and P. Wang, "A global assessment of climate-water quality relationships in large rivers: an elasticity perspective," *Sci. Total Environ.*, vol. 468–469, pp. 877–91, Jan. 2014.
- [10] Y. C. Universidad Católica Popular del Risaralda. Facultad de Ciencias Básicas e Ingeniería., "Entre ciencia e ingeniería," *Entre Cienc. e Ing.*, vol. 0, no. 9, pp. 33–61, 2011.
- [11] F. Bichai and P. W. M. H. Smeets, "Using QMRA-based regulation as a water quality management tool in the water security challenge: experience from the Netherlands and Australia," *Water Res.*, vol. 47, no. 20, pp. 7315–26, Dec. 2013.
- [12] H. Wong and B. Q. Hu, "Application of improved extension evaluation method to water quality evaluation," *J. Hydrol.*, vol. 509, pp. 539–548, Feb. 2014.
- [13] N. Roig *et al.*, "Assessment of sediment ecotoxicological status as a complementary tool for the evaluation of surface water quality: the Ebro river basin case study," *Sci. Total Environ.*, vol. 503–504, pp. 269–78, Jan. 2015.
- [14] J. S. Lessels and T. F. A. Bishop, "Estimating water quality using linear mixed models with stream discharge and turbidity," *J. Hydrol.*, vol. 498, pp. 13–22, Aug. 2013.
- [15] D. Scannapieco, V. Naddeo, T. Zarra, and V. Belgiorno, "River water quality assessment: A comparison of binary- and fuzzy logic-based approaches," *Ecol. Eng.*, vol. 47, pp. 132–140, Oct. 2012.
- [16] X. Seguí *et al.*, "Fuzzy model for risk assessment of persistent organic pollutants in aquatic ecosystems," *Environ. Pollut.*, vol. 178, pp. 23–32, Jul. 2013.
- [17] J. Beyer *et al.*, "Environmental risk assessment of combined effects in aquatic ecotoxicology: a discussion paper," *Mar. Environ. Res.*, vol. 96, pp. 81–91, May 2014.
- [18] L. H. Nowell, J. E. Norman, P. W. Moran, J. D. Martin, and W. W. Stone, "Pesticide Toxicity Index--a tool for assessing potential toxicity of pesticide mixtures to freshwater aquatic organisms," *Sci. Total Environ.*, vol. 476–477, pp. 144–57, Apr. 2014.
- [19] E. Silva, M. A. Daam, and M. J. Cerejeira, "Predicting the aquatic risk of realistic pesticide mixtures to species assemblages in Portuguese river basins," *J. Environ. Sci.*, vol. 31, pp. 12–20, Mar. 2015.
- [20] A. S. Monsalve, S. M. D. Criollo, M. E. V. Uribe, J. F. G. Mantilla, and A. R. Forero, "Exposición a plaguicidas en los habitantes de la ribera del Río Bogotá (Suesca) y en el pez Capitán," *Rev. Ciencias la Salud*, vol. 10, no. SPECIAL ISSUE, pp. 29–41, 2012.
- [21] C. A. Morrissey *et al.*, "Neonicotinoid contamination of global surface waters and associated risk to aquatic invertebrates: A review," *Environ. Int.*, vol. 74, pp. 291–303, Jan. 2015.
- [22] C. E. Lin, C. T. Chen, C. M. Kao, A. Hong, and C. Y. Wu, "Development of the sediment and water quality management strategies for the Salt-water River, Taiwan," *Mar. Pollut. Bull.*, vol. 63, no. 5–12, pp. 528–34, Jan. 2011.
- [23] M. L. Feo, A. Ginebreda, E. Eljarrat, and D. Barceló, "Presence of pyrethroid pesticides in water and sediments of Ebro River Delta," *J. Hydrol.*, vol. 393, no. 3–4, pp. 156–162, Nov. 2010.
- [24] G. Göransson, J. Norrman, M. Larson, C. Alén, and L. Rosén, "A methodology for estimating risks associated with landslides of contaminated soil into rivers," *Sci. Total Environ.*, vol. 472, pp. 481–95, Feb. 2014.
- [25] R. Carafa *et al.*, "Water toxicity assessment and spatial pollution patterns identification in a Mediterranean River Basin District. Tools for water management and risk analysis," *Sci. Total Environ.*, vol. 409, no. 20, pp. 4269–79, Sep. 2011.
- [26] F. Malaguerra, H.-J. Albrechtsen, and P. J. Binning, "Assessment of the contamination of drinking water supply wells by pesticides from surface water resources using a finite element reactive transport model and global sensitivity analysis techniques," *J. Hydrol.*, vol. 476, pp. 321–331, Jan. 2013.
- [27] J. Cristale, A. Katsoyiannis, A. J. Sweetman, K. C. Jones, and S. Lacorte, "Occurrence and risk assessment of organophosphorus and brominated flame retardants in the River Aire (UK)," *Environ. Pollut.*, vol. 179, pp. 194–200, Aug. 2013.
- [28] W. Ocampo-Duque, J. Sierra, N. Ferré-Huguet, M. Schuhmacher, and J. L. Domingo, "Estimating the environmental impact of micro-pollutants in the low Ebro River (Spain): an approach based on screening toxicity with *Vibrio fischeri*," *Chemosphere*, vol. 72, no. 5, pp. 715–21, Jun. 2008.
- [29] W. A. Ocampo Duque, "On the development of decision-making systems based on fuzzy models to assess water quality in rivers." Universitat Rovira i Virgili, 03-Feb-2009.
- [30] C. Peña, D. Carter, and F. Ayala-Fierro, *Toxicología ambiental: Evaluación de riesgos y restauración ambiental*. Distributed on the Internet via the Southwest Hazardous Waste Program website at <http://superfund.pharmacy.arizona.edu/toxamb/>, 2001.
- [31] J. Kovarova *et al.*, "Assessment of POP's contamination of the Svitava and Svratka rivers using selected biochemical markers," *Toxicol. Lett.*, vol. 189, p. S193, Sep. 2009.
- [32] B. M. Sharma, G. K. Bharat, S. Tayal, L. Nizzetto, and T. Larssen, "The legal framework to manage chemical pollution in India and the lesson from the Persistent Organic Pollutants (POPs)," *Sci. Total Environ.*, vol. 490, pp. 733–47, Aug. 2014.
- [33] A. Roustan, M. Aye, M. De Meo, and C. Di Giorgio, "Genotoxicity of mixtures of glyphosate and atrazine and their environmental transformation products before and after photoactivation," *Chemosphere*, vol. 108, pp. 93–100, Aug. 2014.
- [34] S. A. Dar, A. R. Yousuf, M.-H. Balkhi, F. A. Ganai, and F. A. Bhat, "Assessment of endosulfan induced genotoxicity and mutagenicity manifested by oxidative stress pathways in freshwater cyprinid fish crucian carp (*Carassius carassius* L.)," *Chemosphere*, vol. 120, pp. 273–283, Feb. 2015.
- [35] Y. Ye *et al.*, "Assessing of genotoxicity of 16 centralized source-waters in China by means of the SOS/umu assay and the micronucleus test: initial identification of the potential genotoxicants by use of a GC/MS method and the QSAR Toolbox 3.0," *Mutat. Res. Genet. Toxicol. Environ. Mutagen.*, vol. 763, pp. 36–43, Mar. 2014.
- [36] W.-R. Liu *et al.*, "Biocides in the Yangtze River of China: spatiotemporal distribution, mass load and risk assessment," *Environ. Pollut.*, vol. 200, pp. 53–63, May 2015.
- [37] M. Younes and H. Galal-Gorchev, "Pesticides in drinking water--a case study," *Food Chem. Toxicol.*, vol. 38, no. 1 Suppl, pp. S87-90, Jan. 2000.
- [38] R. Gwiazda, C. K. Paull, W. Ussler, and C. R. Alexander, "Evidence of modern fine-grained sediment accumulation in the Monterey Fan from measurements of the pesticide DDT and its metabolites," *Mar. Geol.*, vol. 363, pp. 125–133, May 2015.
- [39] A. Silva, S. A. Figueiredo, M. G. Sales, and C. Delerue-Matos, "Ecotoxicity tests using the green algae *Chlorella vulgaris*—A useful

- tool in hazardous effluents management,” *J. Hazard. Mater.*, vol. 167, no. 1, pp. 179–185, 2009.
- [40] S.-W. Lee, S.-M. Kim, and J. Choi, “Genotoxicity and ecotoxicity assays using the freshwater crustacean *Daphnia magna* and the larva of the aquatic midge *Chironomus riparius* to screen the ecological risks of nanoparticle exposure,” *Environ. Toxicol. Pharmacol.*, vol. 28, no. 1, pp. 86–91, 2009.
- [41] M. V. Pablos *et al.*, “Use of a novel battery of bioassays for the biological characterisation of hazardous wastes,” *Ecotoxicol. Environ. Saf.*, vol. 72, no. 5, pp. 1594–1600, Jul. 2009.
- [42] E. Pasichna, “Use of Photosynthesis and Respiration of Hydrophytes for Water Toxicity Definition,” in *Equidosimetry — Ecological Standardization and Equidosimetry for Radioecology and Environmental Ecology*, Berlin/Heidelberg: Springer-Verlag, 2005, pp. 427–431.
- [43] A. P. Díaz-Pulido *et al.*, “Sustainable Development and the Right to Water in Colombia,” *Estud. Socio-Jurídicos*, vol. 11, no. 1, pp. 84–116, 2009.
- [44] E. N. Papadakis, Z. Vryzas, A. Kotopoulou, K. Kintzikoglou, K. C. Makris, and E. Papadopoulou-Mourkidou, “A pesticide monitoring survey in rivers and lakes of northern Greece and its human and ecotoxicological risk assessment,” *Ecotoxicol. Environ. Saf.*, vol. 116, pp. 1–9, Jun. 2015.
- [45] M. I. Pinto, H. D. Burrows, G. Sontag, C. Vale, and J. P. Noronha, “Priority pesticides in sediments of European coastal lagoons: A review,” *Mar. Pollut. Bull.*, vol. 112, no. 1, pp. 6–16, 2016.
- [46] R. D. Wauchope, “The Pesticide Content of Surface Water Draining from Agricultural Fields—A Review1,” *J. Environ. Qual.*, vol. 7, no. 4, p. 459, 1978.
- [47] C. A. R. Gómez, A. J. Saavedra-Montes, and C. A. Ramos-Paja, “DC-DC converters in wind systems for micro-generation: a systematic review,” *Revista de Ingeniería*, no. 40, pp. 14–19, 29-Jul-2014.
- [48] Y. Wang, J. M. Wilson, and J. M. VanBriesen, “The effect of sampling strategies on assessment of water quality criteria attainment,” *J. Environ. Manage.*, vol. 154C, pp. 33–39, Feb. 2015.
- [49] S. Rehana and P. P. Mujumdar, “Climate change induced risk in water quality control problems,” *J. Hydrol.*, vol. 444–445, pp. 63–77, Jun. 2012.
- [50] S. Munyika, V. Kongo, and R. Kimwaga, “River health assessment using macroinvertebrates and water quality parameters: a case of the orange river in namibia,” *Phys. Chem. Earth, Parts A/B/C*, vol. 76, pp. 140–148, Jan. 2015.
- [51] R. López-Roldán, A. Rubalcaba, J. Martín-Alonso, S. González, V. Martí, and J. L. Cortina, “Assessment of the water chemical quality improvement based on human health risk indexes: Application to a drinking water treatment plant incorporating membrane technologies,” *Sci. Total Environ.*, Apr. 2015.
- [52] X.-H. Zhang, “A Study on the Water Environmental Quality Assessment of Fenjiang River in Yaan City of Sichuan Province in China,” *IERI Procedia*, vol. 9, pp. 102–109, 2014.
- [53] E. Silva, M. A. Daam, and M. J. Cerejeira, “Aquatic risk assessment of priority and other river basin specific pesticides in surface waters of Mediterranean river basins,” *Chemosphere*, vol. 135, pp. 394–402, May 2015.
- [54] M. Köck *et al.*, “Integrated ecotoxicological and chemical approach for the assessment of pesticide pollution in the Ebro River delta (Spain),” *J. Hydrol.*, vol. 383, no. 1–2, pp. 73–82, Mar. 2010.
- [55] U. S. McKnight, J. J. Rasmussen, B. Kronvang, P. J. Binning, and P. L. Bjerg, “Sources, occurrence and predicted aquatic impact of legacy and contemporary pesticides in streams,” *Environ. Pollut.*, vol. 200, pp. 64–76, May 2015.
- [56] M. Köck-Schulmeyer, A. Ginebreda, S. González, J. L. Cortina, M. L. de Alda, and D. Barceló, “Analysis of the occurrence and risk assessment of polar pesticides in the Llobregat River Basin (NE Spain),” *Chemosphere*, vol. 86, no. 1, pp. 8–16, Jan. 2012.
- [57] B. M. Teklu, P. I. Adriaanse, M. M. S. Ter Horst, J. W. Deneer, and P. J. Van den Brink, “Surface water risk assessment of pesticides in Ethiopia,” *Sci. Total Environ.*, vol. 508, pp. 566–74, Mar. 2015.
- [58] M. Kuzmanović, A. Ginebreda, M. Petrović, and D. Barceló, “Risk assessment based prioritization of 200 organic micropollutants in 4 Iberian rivers,” *Sci. Total Environ.*, vol. 503–504, pp. 289–99, Jan. 2015.
- [59] E. De Gerónimo, V. C. Aparicio, S. Bárbaro, R. Portocarrero, S. Jaime, and J. L. Costa, “Presence of pesticides in surface water from four sub-basins in Argentina,” *Chemosphere*, vol. 107, pp. 423–31, Jul. 2014.
- [60] F. Tobón M and L. López G, “Genotoxicity of water contaminated by plaguicidas in an area of Antioquia,” *Rev. MVZ Córdoba*, vol. 16, no. 2, pp. 2605–2615, 2011.
- [61] J. González, L. F. Carvajal, and M. Toro, “Water quality index based on fuzzy logic applied to the Aburra river basin in the jurisdiction of the Metropolitan Area,” *Dynacolombia*, vol. 79, no. 171, pp. 50–58, 2012.
- [62] A. M. Forero-Céspedes, G. Reinoso-Flórez, and C. Gutiérrez, “Evaluación de la calidad del agua del río Opía (Tolima-Colombia) mediante macroinvertebrados acuáticos y parámetros fisicoquímicos,” *Caldasia*, vol. 35, no. 2, pp. 371–387, 02-Nov-2012.
- [63] D. Walker, D. Jakovljević, D. Savić, and M. Radovanović, “Multi-criterion water quality analysis of the Danube River in Serbia: A visualisation approach,” *Water Res.*, vol. 79, pp. 158–172, Aug. 2015.
- [64] R. Sarria-Villa, W. Ocampo-Duque, M. Páez, and M. Schuhmacher, “Presence of PAHs in water and sediments of the Colombian Cauca River during heavy rain episodes, and implications for risk assessment,” *Sci. Total Environ.*, vol. 540, pp. 455–65, Jan. 2016.
- [65] R. Li, Z. Zou, and Y. An, “Water quality assessment in Qu River based on fuzzy water pollution index method,” *J. Environ. Sci.*, vol. 50, pp. 87–92, 2016.
- [66] L. M. Jaacks and L. R. Staimez, “Association of persistent organic pollutants and non-persistent pesticides with diabetes and diabetes-related health outcomes in Asia: A systematic review,” *Environ. Int.*, vol. 76, pp. 57–70, Mar. 2015.
- [67] I. C. Yadav *et al.*, “Current status of persistent organic pesticides residues in air, water, and soil, and their possible effect on neighboring countries: A comprehensive review of India,” *Sci. Total Environ.*, vol. 511, pp. 123–137, Apr. 2015.
- [68] O. Mehrpour, P. Karrari, N. Zamani, A. M. Tsatsakis, and M. Abdollahi, “Occupational exposure to pesticides and consequences on male semen and fertility: a review,” *Toxicol. Lett.*, vol. 230, no. 2, pp. 146–56, Oct. 2014.



Jurado Eraso, Mario Alberto Ingeniero químico con énfasis en Procesos Químicos, Catalíticos y Biotecnológicos. Especialista y Magister en Ingeniería Sanitaria y Ambiental. Formación Docente no formal. Cuenta con varios artículos internacionales y nacionales publicados. Ha participado como ponente en seminarios a nivel nacional e internacional en el área del diagnóstico de la contaminación.

Experiencia profesional como docente a nivel de pregrado y posgrado. Ha sido, Laboratorista a cargo del Laboratorio de Investigaciones Ambientales de la Pontificia Universidad Javeriana de Cali, Jefe de la planta de tratamiento de lixiviados en la empresa EMAS PASTO S.A. E.S.P y Contratista en las áreas de Modelación Ambiental y Transporte de Contaminantes en Corrientes Superficiales y Ecotoxicología.

Actualmente labora como docente investigador para el Programa de Ingeniería Ambiental de la Facultad de Ingeniería de la Universidad Mariana (Pasto-Colombia). Siendo Miembro del Grupo de Investigaciones Ambientales (GIA).



Iván Darío Mercado Martínez, Ingeniero químico con énfasis en el Área Ambiental, Especialista y Magister en Ingeniería Ambiental. Cuenta con varios artículos internacionales (20) y nacionales (10) publicados. Ha sido investigador de los grupos de Colciencias: TECNOLÓGICO, avalado por la Universidad Libre de Colombia sede Bogotá; y GICI, avalado por la Universidad De San Buenaventura seccional Cartagena. Además, ha dictado clases en la Universidad del Magdalena

(Santa Marta), Universidad de San Buenaventura seccional Cartagena y Universidad del Atlántico.

Actualmente labora como docente investigador para el Programa de Ingeniería Agroindustrial de la Facultad de Ingeniería de la Universidad del Atlántico (Barranquilla-Colombia). Siendo Miembro del Grupo de Investigaciones agroindustrial (GIA) y Miembro del Grupo de Investigación en Biotecnología de Microalgas, Fisicoquímica Aplicada y Estudios Ambientales.