

UNIVERSIDAD FEDERAL DE SÃO CARLOS
CENTRO DE CIENCIAS BIOLÓGICAS Y DE LA SALUD
PROGRAMA DE POSGRADO EN CIENCIAS AMBIENTALES

MAURICIO JOSÉ ROSSO PINTO

**AMENAZAS Y VULNERABILIDAD SOCIOAMBIENTAL ASOCIADAS A LA
CONTAMINACIÓN POR METALES PESADOS EN LA CUENCA HIDROGRÁFICA
DEL RÍO QUITO (CHOCÓ-COLOMBIA):** Propuesta de una estructura sistémica para la
gestión del riesgo

**AMEAÇAS E VULNERABILIDADE SOCIOAMBIENTAL ASSOCIADAS À
POLUIÇÃO POR METAIS PESADOS NA BACIA HIDROGRÁFICA DO RÍO QUITO
(CHOCÓ-COLÔMBIA):** Proposta de uma estrutura sistêmica para a gestão de riscos

**SOCIO-ENVIRONMENTAL HAZARDS AND VULNERABILITY ASSOCIATED
WITH HEAVY METAL POLLUTION IN THE QUITO RIVER WATERSHED
(CHOCÓ-COLOMBIA):** Proposal for a Systemic Structure for Risk Management

SÃO CARLOS-SP
2025

MAURICIO JOSÉ ROSSO PINTO

**AMENAZAS Y VULNERABILIDAD SOCIOAMBIENTAL ASOCIADAS A LA
CONTAMINACIÓN POR METALES PESADOS EN LA CUENCA HIDROGRÁFICA
DEL RÍO QUITO (CHOCÓ-COLOMBIA):** Propuesta de una estructura sistémica para la
gestión del riesgo

Tesis presentada al Programa de Posgrado en
Ciencias Ambientales de la Universidad Federal de
São Carlos (UFSCar), como parte de los requisitos
para obtener el título de Doctor en Ciencias
Ambientales.

Director: Prof. Dr. Frederico Yuri Hanai

Codiretor: Prof. Dr. José Luís Marrugo Negrete

SÃO CARLOS-SP
2025



UNIVERSIDADE FEDERAL DE SÃO CARLOS

Centro de Ciências Biológicas e da Saúde
Programa de Pós-Graduação em Ciências Ambientais

Folha de Aprovação

Defesa de Tese de Doutorado do candidato Mauricio Jose Rosso Pinto, realizada em 23/07/2025.

Comissão Julgadora:

Prof. Dr. Frederico Yuri Hanai (UFSCar)

Prof. Dr. José Luis Marrugo Negrete (UCO)

Profa. Dra. Monise Terra Cerezini (UNICAMP)

Prof. Dr. Manuel Haminton Salas Moreno (UTCH)

Prof. Dr. Jonathan Muthuswamy Ponniah (IPN)

Prof. Dr. Wilfredo Marimon Bolívar (MINAMBIENTE)

O Relatório de Defesa assinado pelos membros da Comissão Julgadora encontra-se arquivado junto ao Programa de Pós-Graduação em Ciências Ambientais.

Pinto., Mauricio Jose Rosso

Ameaças e vulnerabilidade socioambiental associadas à poluição por metais pesados na bacia hidrográfica do rio Quito (Chocó-Colômbia):: proposta de uma estrutura sistêmica para a gestão de riscos / Mauricio Jose Rosso Pinto. -- 2025.
256f.

Tese de Doutorado - Universidade Federal de São Carlos,
campus São Carlos, São Carlos

Orientador (a): Frederico Yuri Hanai

Banca Examinadora: Manuel Haminton Salas Moreno,
Monise Terra Cerezini, Jonathan Muthuswamy Ponniah,
Wilfredo Marimon Bolívar

Bibliografia

1. Gestão de risco socioambiental. 2. Poluição por metais pesados. 3. Saúde ambiental. I. Pinto., Mauricio Jose Rosso. II. Título.

Ficha catalográfica desenvolvida pela Secretaria Geral de Informática
(SIn)

DADOS FORNECIDOS PELO AUTOR

Dedicatória

A mi esposa, mis padres, hermanos y demás seres queridos.

A las comunidades afrocolombianas e indígenas del Atrato, defensores del ambiente y la vida.

A mis estudiantes de ingeniería ambiental de la Universidad de Córdoba.

NOTAS

“O presente trabalho foi realizado com apoio da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior – Brasil (CAPES) - Código de Financiamento 001”

Segundo o artigo 43 do título VIII do regimento interno do Programa de Pós-graduação em ciências ambientais da Universidade Federal de São Carlos: “*As Dissertações de Mestrado e as Teses de doutorado podem ser redigidas e defendidas em outros idiomas, contanto que uma síntese das mesmas seja apresentada em português, por escrito e na defesa oral*”. Por tanto devido à preferência do discente, a tese foi escrita no idioma espanhol.

AGRADECIMIENTOS

Agradezco en primer lugar a Dios, por haberme permitido cumplir este gran logro de mi vida profesional y académica.

Agradezco a mi esposa, por ser mi motivación constante y animarme a entregar todo de mi por nuestros sueños y objetivos de familia.

Agradezco a mis padres, hermanos y demás familiares por su amor y apoyo incondicional.

Agradezco a mi apreciado tutor y amigo, el profesor Frederico Yuri Hanai, quien merece mi total respeto y admiración como profesional y ser humano. Gracias por responder mi correo hace diez años Fred, tu respuesta cambió mi vida.

Agradezco a mi colega, el profesor Humberto Tavera Quiroz, por los consejos ofrecidos en momentos fundamentales de mi vida profesional y personal.

Agradezco a mi codirector, el profesor José Luis Marrugo Negrete, quien ha sido ejemplo de perseverancia, disciplina y excelencia académica. Es un honor ser parte de su equipo.

Agradezco al profesor Roberth Paternina Uribe, Siday Marrugo Madrid, Iván Urango Cárdenas y demás investigadores del Instituto Regional del Agua de la Universidad de Córdoba, por su apoyo y confianza en mí. Así mismo a Jairo Herrera Arango, José Revueltas Martínez, Fredys Padilla Bravo, Gabriel Narváez, Juliana Álzate, Laura Pérez Mendoza, Carlos Bautista, María Claudia Kerguelen y demás colegas del equipo técnico del convenio 705 de 2021.

Agradezco a los respetados miembros de la banca examinadora de esta tesis doctoral, por sus aportes y críticas constructivas.

Agradezco a la ingeniera Daniela Martínez Arrieta, ingeniero Samuel Pinto Argel, al geógrafo Juan Camilo Ospino y al ingeniero Juan David Suárez, por el apoyo brindado durante el desarrollo de este trabajo de investigación.

Agradezco a mis compañeros del grupo de investigación SUSTENTA y a todos los miembros del PPGCam de mi querida UFSCar por acompañarme en esta experiencia de aprendizaje.

Agradezco al Fondo Colombia en Paz, a la Universidad de Córdoba y a la Dirección de Recursos Hídricos del Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible de Colombia, por el financiamiento y supervisión del convenio 705 de 2021, del cual se tomaron parte de los datos para el planteamiento de esta tesis doctoral. Especialmente al supervisor del convenio el Dr. Wilfredo Marimon Bolívar y al Ingeniero Fabian Caicedo Carrascal.

Agradezco a los profesores de la Universidad Tecnológica del Chocó Diego Luis Córdoba, al equipo de WWF Colombia, al Instituto de Investigaciones Ambientales del Pacífico, al Cuerpo Colegiado de Guardines del río Atrato, a los Consejos Comunitarios de la cuenca del río Atrato, a las comunidades indígenas del río Atrato, a las organizaciones de base comunitaria del municipio de Apiadó y de toda la subcuenca del río Quito, y muy especialmente al Señor Bernardino Mosquera, por su fundamental apoyo en el desarrollo de este trabajo de investigación.

RESUMO

Esta pesquisa analisou os fatores de ameaça e vulnerabilidade socioambiental associados à contaminação por metais pesados na bacia do rio Quito (Chocó, Colômbia), reconhecido como sujeito de direitos conforme a Sentença T-622 de 2016. Para isso, foi realizada uma análise etimológica que permitiu estabelecer a relação de convolução entre ameaça e vulnerabilidade como fatores de risco externo e interno, respectivamente. Com base em informações cartográficas, avaliou-se a expansão da mineração na bacia do rio Quito e foram determinados níveis de contaminação em sedimentos por mercúrio (5,22 mg/kg), cromo (56,85 mg/kg) e arsênio (20,31 mg/kg) em locais altamente impactados pela atividade mineradora, além de turbidez superior a 250 NTU. Constatou-se uma alteração morfológica significativa no sistema fluvial, incluindo o acúmulo de bancos de areia com volume estimado superior a 43 milhões de m³, e uma elevada exposição da população a riscos ambientais e à saúde. Paralelamente, foi realizada uma Revisão Bibliográfica Sistemática de 98 artigos científicos, que permitiu identificar 66 ferramentas (em sua maioria índices), bem como 58 aspectos socioambientais considerados em estudos sobre gestão de risco. A análise desses resultados evidenciou que as ferramentas identificadas se concentram na quantificação das concentrações de metais pesados, sem incorporar dimensões sociais, econômicas, ecológicas e culturais relevantes para a avaliação integral dos fatores de risco. Assim, com o objetivo de propor uma estrutura sistêmica para a gestão integral do risco socioambiental decorrente da contaminação por metais pesados na bacia do rio Quito, foi realizada a priorização dos 58 aspectos por meio de consulta a especialistas, e suas relações de influência e dependência foram analisadas com o uso do software MICMAC. Esse processo permitiu identificar 21 variáveis-chave dentro do sistema. Com base na análise etimológica dos fatores de risco, foi construída uma estrutura sistêmica em que variáveis como a contaminação da água e do solo por metais pesados representam a magnitude da ameaça; a expansão da mineração ilegal está relacionada à extensão da ameaça; e fatores climáticos, como a pluviosidade, associam-se ao tempo. Quanto à vulnerabilidade, a exposição se manifesta em variáveis como a ingestão de água e alimentos contaminados, enquanto a sensibilidade e a capacidade de adaptação estão relacionadas ao acesso a serviços de saneamento e à cobertura vegetal. O modelo conceitual orienta a formulação de instrumentos para a gestão integral do risco socioambiental em bacias hidrográficas impactadas pela mineração ilegal, como é o caso do rio Quito.

Palavras-chave: rios como sujeitos de direito, Elementos Potencialmente Tóxicos, mineração aluvionar de ouro, gestão de risco socioambiental, saúde humana e ambiental.

ABSTRACT

This research analyzed the factors of hazard and socio-environmental vulnerability associated with heavy metal contamination in the Quito River basin (Chocó, Colombia), recognized as a subject of rights under Constitutional Court Ruling T-622 of 2016. An etymological analysis was conducted, through which the convolution relationship between hazard and vulnerability was established as external and internal components of risk, respectively. Based on cartographic information, the expansion of mining activities in the Quito River basin was evaluated, and contamination levels in sediments were determined, showing concentrations of mercury (5,22 mg/kg), chromium (56,85 mg/kg), and arsenic (20,31 mg/kg) in areas heavily impacted by mining, along with turbidity levels exceeding 250 NTU. A significant morphological alteration of the fluvial system was evidenced, including the accumulation of sand banks with an estimated volume of over 43 million m³, and high population exposure to environmental and health-related risks. In parallel, a systematic literature review of 98 scientific articles was conducted, which enabled the identification of 66 tools (mostly indices) and 58 socio-environmental aspects considered in risk management studies. The analysis of this body of work revealed that the identified tools focus primarily on the quantification of heavy metal concentrations, without integrating relevant social, economic, ecological, and cultural dimensions for a comprehensive risk assessment. Accordingly, with the aim of proposing a systemic structure for the integrated management of socio-environmental risk resulting from heavy metal contamination in the Quito River basin, the 58 aspects were prioritized through expert consultation, and their influence–dependence relationships were analyzed using MICMAC software. This process led to the identification of 21 key variables within the system. Based on the etymological analysis of risk components, a systemic structure was developed in which variables such as water and soil contamination by heavy metals represent the magnitude of the hazard; the expansion of illegal mining is linked to its spatial extent; and climatic factors such as rainfall are associated with the temporal dimension. Regarding vulnerability, exposure is reflected in variables such as the ingestion of contaminated water and food, while sensitivity and adaptive capacity are linked to access to sanitation services and vegetation cover. The conceptual model provides a framework for guiding the formulation of integrated socio-environmental risk management instruments in river basins affected by illegal mining, such as the Quito River.

Keywords: rights of rivers, Potentially Toxic Elements, alluvial gold mining, socio-environmental risk management, human and environmental health.

RESUMEN

Esta investigación analizó los factores de amenaza y vulnerabilidad socioambiental asociados a la contaminación por metales pesados en la cuenca del río Quito (Chocó, Colombia), sujeto de derechos mediante según la Sentencia T-622 de 2016. Para ello, se llevó a cabo un análisis etimológico del cual se estableció la relación de convolución entre la amenaza y la vulnerabilidad como factores de riesgo externo e interno respectivamente. A partir de información cartográfica se evaluó la expansión de la minería en la cuenca del río Quito y se determinaron niveles de contaminación en sedimento por mercurio (5,22 mg/kg), cromo (56,85 mg/kg) y arsénico (20,31 mg/kg) en sitios altamente intervenidos por minería, además de turbidez superior a 250 NTU. Se evidenció una alteración morfológica significativa del sistema fluvial, incluyendo la acumulación de bancos de arena con un volumen estimado de más de 43 millones de m³, y una alta exposición de la población a riesgos ambientales y de salud. Paralelamente, se realizó una Revisión Bibliográfica sistemática de 98 artículos científicos, la cual permitió identificar 66 herramientas (en su mayoría índices), así como, 58 aspectos socioambientales considerados en estudios sobre gestión del riesgo. El análisis de este resultado permitió concluir que las herramientas identificadas se centran en la cuantificación de concentraciones de metales pesados, sin integración de aspectos sociales, económicos, ecológicos y culturales relevantes para la evaluación integral de los factores de riesgo. Así, con el objetivo de proponer una estructura sistémica para la gestión integral del riesgo socioambiental derivado de la contaminación por metales pesados en la cuenca del río Quito, se realizó una priorización de los 58 aspectos mediante consulta a expertos y se analizaron las relaciones de influencia y dependencia a partir del software MICMAC. Esto permitió identificar 21 variables clave dentro del sistema. A partir del análisis etimológico de los factores de riesgos se construyó una estructura sistémica donde variables como la contaminación de agua y suelos por metales pesados representan la magnitud de la amenaza, la expansión de la minería ilegal se vincula con la extensión de la amenaza, mientras que factores climáticos como la pluviosidad se asocian al tiempo. En cuanto a la vulnerabilidad, la exposición se refleja en variables como la ingesta de agua y alimentos contaminados, mientras que la sensibilidad y la capacidad de adaptación se asocian al acceso a servicios de saneamiento y a la cobertura vegetal. El modelo conceptual orienta la formulación de instrumentos de gestión integral del riesgo socioambiental, en cuencas afectadas por la minería ilegal como el río Quito.

Palabras clave: ríos sujetos de derecho, Elementos Potencialmente Tóxicos, minería aluvial de oro, gestión del riesgo socioambiental, salud humana y ambiental.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1. Dispersión de metales en el ambiente	37
Figura 2. Pasos para el establecimiento de un modelo conceptual para la gestión de riesgos ambientales	51
Figura 3. Estructura de la investigación	55
Figura 4. Esquema metodológico de la revisión narrativa	58
Figura 5. Flujograma de relaciones etimológicas entre los conceptos de amenaza, vulnerabilidad y riesgo	75
Figura 6. Flujograma metodológico para el desarrollo de la RBS	80
Figura 7. Resultados de la aplicación del Filtro 1	90
Figura 8. Clasificación de artículos aprobados por año.....	91
Figura 9. Herramientas identificadas en al menos 2 artículos seleccionados.....	95
Figura 10. Distribución porcentual de aspectos socioambientales por categoría.....	108
Figura 11. Procedimiento Grupo focal	112
Figura 12. Caracterización y análisis de actores.....	121
Figura 13. Parámetros fisicoquímicos del agua superficial.....	125
Figura 14. Perfil del Igeo para Mercurio y Cromo	131
Figura 15. Perfil del Igeo para Níquel y Zinc.....	131
Figura 16. Perfil del Igeo para Plomo y Arsénico	132
Figura 17. Serie histórica de caudales simulados	161
Figura 18. Curva de permanencia del río Quito	162
Figura 19. Precipitación mensual acumulada multianual.....	165
Figura 20. Promedio mensual multianual de temperaturas	166
Figura 21. Boxplot de humedad relativa diaria por meses en río Quito.....	167
Figura 22. Flujograma metodológico para elaboración de la estructura sistémica	178
Figura 23. Priorización por categoría de los aspectos socioambientales.....	185
Figura 24. Mapa de influencia y dependencia.....	190
Figura 25. Relaciones de dependencia entre variables de entrada y variables descartadas....	194
Figura 26. Estructura sistémica propuesta.....	199

LISTA DE MAPAS

Mapa 1. Chocó biogeográfico	21
Mapa 2. Cuenca del río Atrato	24
Mapa 3. Sitios de muestreo en agua superficial y sedimentos	116
Mapa 4. Mapa de velocidad máxima para el Q_{50} y para un evento con recurrencia de 100 años en el río Quito.....	135
Mapa 5. Acercamiento al mapa de velocidad sobre regiones de interés para caudal más probable Q_{50}	137
Mapa 6. Acercamiento de mapa de velocidad máxima sobre regiones de para evento con recurrencia de 100 años.	138
Mapa 7. Acercamiento al mapa de profundidad sobre regiones de interés, para caudal más probable Q_{50}	140
Mapa 8. Acercamiento al mapa de profundidad máxima sobre regiones de interés, para evento con periodo de retorno de 100 años.....	141
Mapa 9. Área de extracción minera en la cuenca del río Quito.....	143
Mapa 10. Perturbación del medio físico por la actividad minera.....	144
Mapa 11. Bancos de arena en la cuenca del río Quito.....	146
Mapa 12. Geología con centros poblados.....	150
Mapa 13. Geomorfología con centros poblados.....	151
Mapa 14. Geomorfología asociada al cauce principal del río Quito	152
Mapa 15. Coberturas de la tierra a 2002 con centros poblados.....	155
Mapa 16. Coberturas de la tierra a 2020 con centros poblados.....	156
Mapa 17. Unidades de suelos en la cuenca del río Quito	158
Mapa 18. Red Hídrica con consejos comunitarios y centros poblados	160
Mapa 19. Áreas de la cuenca del río Quito dentro de la reserva establecida en la Ley 2 de 1959	164

LISTA DE TABLAS

Tabla 1. Resumen de impactos ambientales asociados a la minería aluvial en el río Atrato ...	34
Tabla 2. EPTs asociados a fuentes antrópicas	36
Tabla 3. Criterios de la estrategia de búsqueda	59
Tabla 4. Filtro para la selección de literatura	61
Tabla 5. Conceptos de amenaza obtenidos en la revisión narrativa de literatura.....	62
Tabla 6. Conceptos de vulnerabilidad obtenidos en la revisión narrativa de literatura.....	65
Tabla 7. Conceptos de riesgo obtenidos en la revisión narrativa de literatura	70
Tabla 8. Conceptos establecidos para los términos de amenaza, vulnerabilidad y riesgo	73
Tabla 9. Selección de las palabras claves para el objetivo A	84
Tabla 10. Selección de las palabras claves para el objetivo A	84
Tabla 11. Selección de las palabras clave para el objetivo B	85
Tabla 12. <i>Strings</i> Objetivo A.....	85
Tabla 13. <i>Strings</i> objetivo B.....	86
Tabla 14. Filtro 1- Análisis del título, objetivo y resumen.....	87
Tabla 15. Filtro 2 – Análisis de la introducción y conclusión.....	88
Tabla 16. Análisis del texto completo	88
Tabla 17. Número de aspectos socioambientales identificados por artículo.....	101
Tabla 18. Aspectos socioambientales clasificados por categoría.....	105
Tabla 19. Metodología de análisis – Código Ultratrace 2	114
Tabla 20. Metodología de análisis – Código Ultratrace 3	114
Tabla 21. Metodologías de análisis para metales preciosos y mercurio.....	115
Tabla 22. Interpretación de rangos del ICOMINERA.....	118
Tabla 23. Calidad del suelo según los valores del Índice de Geo-acumulación.....	119
Tabla 24. Factores directos e indirectos asociados a la amenaza de contaminación del río Quito por metales pesados.....	122
Tabla 25. Factores directos e indirectos asociados a la vulnerabilidad socioambiental de la cuenca ante la contaminación por metales pesados.....	123
Tabla 26. Resultados de la concentración de metales tóxicos.....	126
Tabla 27. Valores promedio por zona de la cuenca hidrográfica del río Quito.....	128
Tabla 28. Unidades cronoestratigráficas presentes en la zona	147
Tabla 29. Caudales máximos y mínimos para diferentes periodos de retorno en el río Quito	163

Tabla 30. Cambios aplicados al listado de aspectos socioambientales	179
Tabla 31. Resultados para el criterio de relevancia del aspecto	180
Tabla 32. Resultados para el criterio de dependencia del aspecto.....	182
Tabla 33. Resultados para el criterio de dependencia del aspecto.....	184
Tabla 34. Listado definitivo de aspectos socioambientales.....	187
Tabla 35. Tipos de variables generados por el mapa de influencia y dependencia.....	191
Tabla 36. Variables relacionadas con la amenaza y vulnerabilidad.....	196

LISTA DE APÉNDICES

Apéndice A. Listado de artículos seleccionados a partir de la Revisión Bibliográfica Sistemática	228
Apéndice B. Caja de herramientas para el análisis de la amenaza, vulnerabilidad y/o riesgo derivado de la contaminación por metales pesados.	234
Apéndice C. Matriz de impactos cruzados para MICMAC	256

CONTENIDO

1. CAPÍTULO INICIAL: GENERALIDADES DE LA INVESTIGACIÓN	18
1.1. CONCEPCIÓN DE LA INVESTIGACIÓN.....	18
1.2. INTRODUCCIÓN AL CONTEXTO TERRITORIAL.....	20
1.3. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA DE INVESTIGACIÓN	27
1.3.1. Problemática ambiental y ecológica.....	27
1.3.2. Problemática socioeconómica y cultural	29
1.4. JUSTIFICACIÓN.....	31
2. OBJETIVOS.....	35
2.1. OBJETIVO GENERAL	35
2.2. OBJETIVOS ESPECÍFICOS	35
3. MARCO TEORICO Y CONCEPTUAL.....	35
3.1. METALES PESADOS Y CONTAMINACIÓN AMBIENTAL	35
3.2. LA AMENAZA DE LOS METALES PESADOS.....	38
3.3. GESTIÓN INTEGRAL DE RECURSOS HÍDRICOS EN COLOMBIA.....	42
3.4. GESTIÓN DE RIESGO DE DESASTRES EN COLOMBIA.....	44
3.5. GOBERNANZA DEL AGUA	46
3.6. RÍOS COMO SUJETOS DE DERECHO: ¿UN NUEVO INSTRUMENTO PARA LA GIRH EN COLOMBIA?.....	48
3.8. MODELOS CONCEPTUALES APLICADOS A LA GESTIÓN AMBIENTAL ..	50
4. ESTRUCTURA DE LA INVESTIGACIÓN	52
5. CAPÍTULO 1. INTERRELACIONES ETIMOLÓGICAS ENTRE LOS CONCEPTOS DE AMENAZA, VULNERABILIDAD Y RIESGO EN EL CONTEXTO DE LA CONTAMINACIÓN HÍDRICA POR METALES PESADOS.	57
5.1. PROCEDIMIENTOS METODOLÓGICOS.....	57
5.2. RESULTADOS	62
5.3. DISCUSIONES	72
5.4. CONSIDERACIONES FINALES	76
6. CAPÍTULO 2. IDENTIFICACIÓN Y CARACTERIZACIÓN DE LOS INDICADORES, HERRAMIENTAS, INSTRUMENTOS Y MODELOS PARA EL ANÁLISIS DE LA AMENAZA, VULNERABILIDAD Y RIESGO ASOCIADO A LA CONTAMINACIÓN HÍDRICA CON METALES PESADOS.....	78
6.1. PROCEDIMIENTOS METODOLÓGICOS.....	79
6.1.1. Planificación de la revisión bibliográfica sistemática	81
6.2. RESULTADOS Y DISCUSIONES	89
6.2.1. Resultados de la aplicación del filtro 1: análisis del título, objetivo, resumen.	89

6.2.2.	Resultados de la aplicación del filtro 2: Análisis de la introducción y conclusión.....	92
6.2.3.	Resultados de la aplicación del tercer análisis: lectura del texto completo.....	93
6.3.	CONSIDERACIONES FINALES	109
7.	CAPÍTULO 3. FACTORES QUE INCIDEN EN LA AMENAZA Y VULNERABILIDAD SOCIOAMBIENTAL ASOCIADA A LA CONTAMINACIÓN POR METALES PESADOS EN LA CUENCA DEL RÍO QUITO.....	110
7.1.	PROCECIMIENTOS METODOLÓGICOS	111
7.1.1.	Identificación de factores asociados a la amenaza y vulnerabilidad	111
7.1.2.	Caracterización de factores asociados a la amenaza y vulnerabilidad	112
7.1.3.	Interpretación de resultados de la caracterización de factores asociados a la amenaza y vulnerabilidad.	116
7.2.	RESULTADOS Y DISCUSIONES	119
7.2.1.	Factores asociados a la amenaza y vulnerabilidad	119
7.2.2.	Caracterización de los factores asociados a la amenaza.....	124
7.2.3.	Caracterización de los factores asociados a la vulnerabilidad.....	147
7.3.	CONSIDERACIONES FINALES	171
8.	CAPÍTULO 4. ESTRUCTURA SISTEMICA PARA EL FORTALECIMIENTO DE LOS INSTRUMENTOS DE GESTIÓN DE RIESGOS SOCIOAMBIENTALES ASOCIADOS A LA CONTAMINACIÓN DEL AGUA POR METALES PESADOS EN LA CUENCA DEL RÍO QUITO.....	172
8.1.	PROCEDIMIENTOS METODOLÓGICOS.....	174
8.1.1.	Análisis estructural mediante matriz de impactos cruzados.....	176
8.1.2.	Definición de tipos de variables	177
8.1.3.	Construcción de la estructura sistémica.....	177
8.2.	RESULTADOS Y DISCUSIONES	179
8.2.1.	Priorización de los aspectos socioambientales de acuerdo con los criterios definidos	180
8.2.2.	Priorización de las categorías asociadas a los aspectos socioambientales	185
8.2.3.	Elaboración de la matriz de impactos cruzados.....	186
8.2.4.	Estructura sistémica para la gestión de riesgos socioambientales en la cuenca del río Quito.....	196
8.3.	CONSIDERACIONES FINALES	200
9.	CONCLUSIONES DE LA INVESTIGACIÓN	202
10.	REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS	205

1. CAPÍTULO INICIAL: GENERALIDADES DE LA INVESTIGACIÓN

1.1. CONCEPCIÓN DE LA INVESTIGACIÓN

En el año 2014, me encontraba en octavo semestre del pregrado en Ingeniería Ambiental de la Universidad de Córdoba, alma mater de la región Cordobesa en el caribe colombiano. Durante este semestre, tuve la oportunidad de cursar una asignatura electiva denominada: impactos ambientales y remediación en minería cuyo contenido abordaba los impactos socioambientales asociados a la actividad minera ilegal y legal en el país, los instrumentos normativos y de gestión existentes para el control de esos impactos y las técnicas de biorremediación.

Para proporcionar más contexto al lector, el departamento de Córdoba es una región de tradición ganadera con producción de leche y carne, su hato presenta el 8% del inventario nacional y el 33% para la región Caribe. También, la agricultura es una actividad económica fundamental, donde los cultivos de maíz tecnificado, maíz tradicional, plátano, yuca, arroz, ñame, algodón, y cacao son los principales en alrededor de 150.000 hectáreas sembradas. No obstante, en las dos últimas décadas, la minería en Córdoba ha venido creciendo, tanto que, según el catastro minero se encuentran vigentes 115 títulos que corresponde a un 4,34% del total de títulos en Colombia, distribuidos en 19 de los 30 municipios del departamento. Entre estos títulos mineros el 44,76 % corresponden a materiales de construcción, un 25,71 % oro, metales preciosos y cobre, un 14,29 % carbón, un 11,43% de otros minerales como calizas, arenas y gravas, y, un 3,81% de ferroníquel (Asamblea Departamental de Córdoba, 2020).

Debido a esta problemática, la Universidad de Córdoba, desde el grupo de investigación en Aguas, Química Aplicada y Ambiental en cabeza del doctor José Luis Marrugo Negrete (profesor de la asignatura impactos ambientales y remediación en minería), ha venido desarrollando desde el año 2008 proyectos de investigación y de extensión enfocados en la evaluación de la contaminación y la toxicología ambiental en zonas mineras de varias regiones del país, iniciando en Córdoba y extendiéndose hacia el sur de Bolívar, bajo Cauca Antioqueño, departamentos de Sucre, Cauca, Chocó e incluso estudios con alcance en todo el territorio nacional. Por ello, al conocer toda esta experiencia y los resultados significativos de la ejecución de proyectos de impacto social y ambiental, decidí vincularme a este grupo de investigación, trabajando inicialmente con tecnologías de oxidación avanzada como la fotocátalisis heterogénea para el tratamiento de aguas residuales de procesos de minería de oro.

A lo largo de mi carrera profesional y académica he tenido la oportunidad de explorar áreas diferentes dentro de las ciencias ambientales: gestión ambiental, saneamiento, gestión de residuos sólidos, evaluación de impacto ambiental, contaminación ambiental, gestión de riesgos, modelación ambiental y fue durante la maestría que decidí enfocarme en el estudio de herramientas de gestión y planificación del recurso hídrico con el fin de proponer técnicas o métodos que pudieran soportar efectivamente los procesos de toma de decisiones, entendiendo que el fin de todo proyecto de investigación es aportar conocimiento para que las autoridades ambientales de cada región del mundo puedan planificar y ejecutar adecuadamente las acciones para la prevención, mitigación y control de los impactos ambientales.

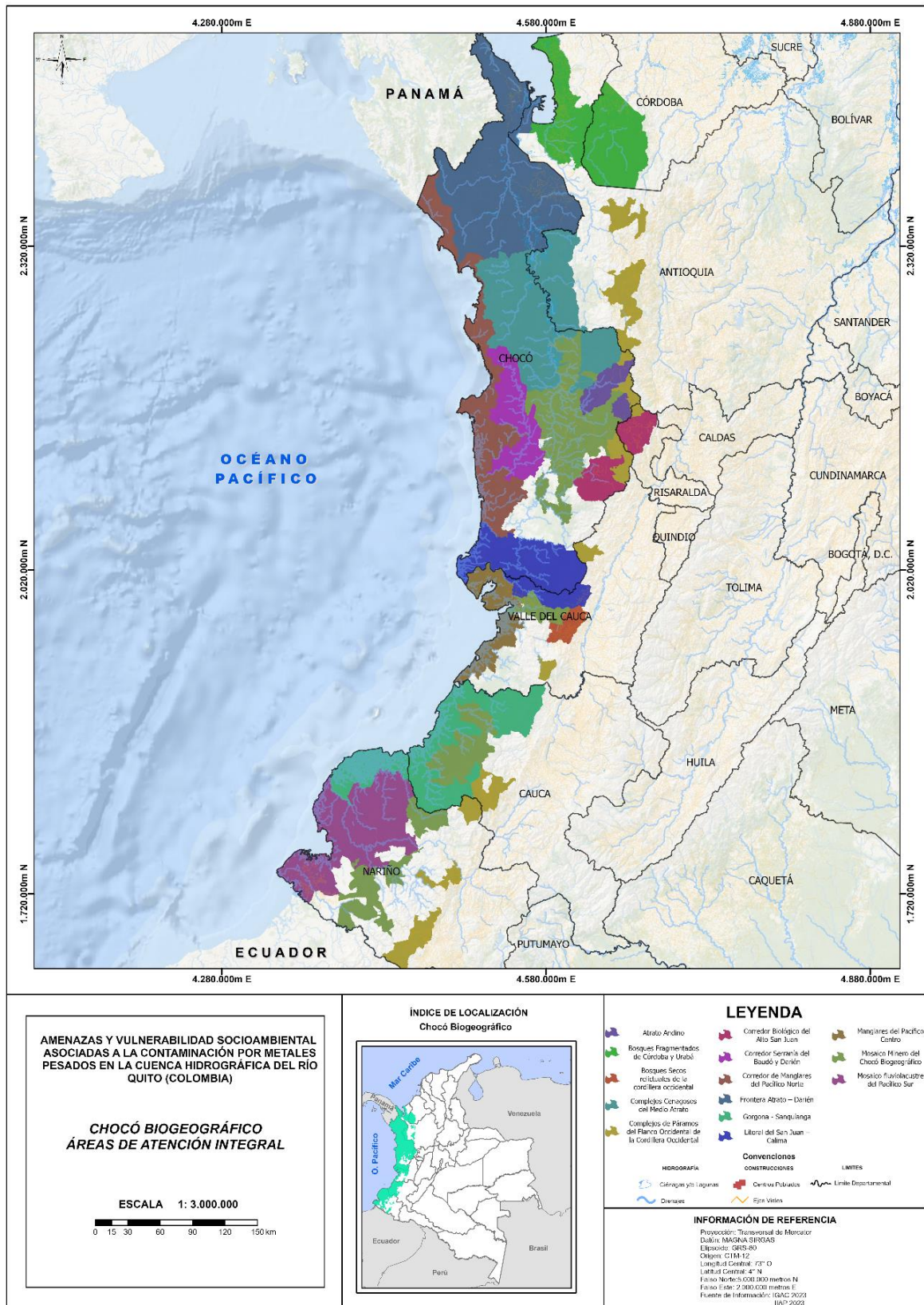
En el año 2020 comencé a coordinar la ejecución de proyectos desde el componente de Ingeniería y de salud ambiental en el grupo de Aguas, Química Aplicada y Ambiental, cuyos objetivos buscaban determinar el comportamiento ambiental de diferentes contaminantes tanto orgánicos como inorgánicos en las matrices ambientales: agua, suelo y aire, así como las posibles afectaciones en la salud humana y ecosistémica. A finales del año 2021, siendo ya docente de tiempo completo del departamento de Ingeniería Ambiental de la Universidad de Córdoba, fui denominado coordinador científico del convenio 705, firmado por la Universidad de Córdoba y el Consorcio Fondo Colombia en Paz 2019, bajo la supervisión de la Dirección de Recursos Hídricos del Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible de Colombia. El objetivo de este convenio fue generar insumos técnicos y de apropiación social para el diseño de la estrategia de rehabilitación y/o restauración ecológica de la cuenca del río Quito (subcuenca del río Atrato, departamento del Chocó), en el marco de la sentencia T-622 de 2016, la cual reconoció al río Atrato, su cuenca y afluentes como una entidad sujeta de derechos a la protección, conservación, mantenimiento y restauración bajo la tutoría y representación legal del Estado y las comunidades étnicas (Corte Constitucional de Colombia, 2016). A partir de este momento, me sumergí en el entendimiento de la dinámica social y ambiental de esta subcuenca del pacífico colombiano, afectada de manera transversal por la minería ilegal, que en ocasiones es administrada por grupos al margen de la Ley, y cuyos impactos ambientales, sociales, económicos y culturales son de alta intensidad y extensión. Percibí que el convenio 705 de 2021, generaría información científica de calidad y detalle, pero que no lograría, dado su alcance, establecer estrategias, herramientas o directrices para gestionar las amenazas socioambientales relacionadas con la contaminación por metales pesados que interactúan en una región intrínsecamente vulnerable como es la cuenca del río Quito. Por ello, bajo la tutoría de los profesores Frederico Yuri Hanai (UFSCar) y José Luis Marrugo Negrete (Unicordoba),

decidí desarrollar la tesis doctoral titulada: *AMENAZAS Y VULNERABILIDAD SOCIOAMBIENTAL ASOCIADAS A LA CONTAMINACIÓN POR METALES PESADOS EN LA CUENCA HIDROGRÁFICA DEL RÍO QUITO (CHOCÓ-COLOMBIA): Propuesta de una estructura sistémica para la gestión del riesgo.*

1.2. INTRODUCCIÓN AL CONTEXTO TERRITORIAL

El Chocó biogeográfico ha sido catalogado como una zona de importancia para la conservación ambiental en Colombia debido a que alberga bosques biodiversos y recursos naturales con amplia oferta de servicios ecosistémicos. Este territorio reviste de un potencial rico en recursos naturales, en diversidad biológica, y posee condiciones bioculturales y bioclimáticas que la hacen una zona eco-estratégica para la regulación de la variabilidad climática nacional y global (Ayala Mosquera, 2023; Poveda-M et al., 2004). La región del Chocó biogeográfico está localizada en el pacífico colombiano y se caracteriza por sus elevados índices de endemismo inmersos en una imponente selva que actúa como corredor biológico. Por todo lo anterior, es considerada en el mundo como un “*Hotspot*” de la biodiversidad. Además, en su extensión ocurre la superposición de resguardos indígenas y territorios colectivos de comunidades afrocolombianas, que lo posicionan como un territorio de diversidad étnica y cultural (Medina Rivas et al., 2016). A continuación, se presenta un mapa del territorio conocido como Chocó Biogeográfico, una de las ecorregiones estratégicas de Colombia.

Mapa 1. Chocó biogeográfico



Fuente: Elaboración propia (2025)

El Chocó es el departamento más extenso de la región del Chocó Biogeográfico, representando el 45,7 % de su área. Política y administrativamente se encuentra dividido en 30 municipios ordenados en cinco subregiones geográficas caracterizadas por corrientes principales de las cuencas hidrográficas más representativas, la Región del Darién con un 33,92 % del territorio departamental, San Juan con 27,46%, Atrato con un 18,46 %, Baudó con 14,27 % y Pacífica (costanera) con un 5,89 %. En su composición poblacional, el 96% está constituida por territorios colectivos de 683 comunidades negras agrupados en 64 consejos comunitarios mayores con 2.339 hectáreas tituladas y 125 resguardos indígenas de las etnias Emberá Dóbida, Embera Katío, Embera Chamí, Wounan y Tule, que corresponden a 26 de los 30 municipios de este departamento (Gobernación del Chocó, 2020).

En la época de la colonia española, el Chocó era visto como una zona fronteriza y el interés de su dominio se centraba en las posibilidades de comercio. Estudios científicos y cartográficos realizados en la zona concretaron los planes de exploración del Virreinato, por lo que a finales del siglo XVII se realizó una migración forzada de esclavos para que fueran la mano de obra de las actividades relacionadas con la minería (Hernández Ospina, 2006; McNeill, 2005). Hacia finales del siglo XIX, el río comenzó a desempeñar un rol central en la vida de la comunidad, inicialmente como fuente directa de recursos esenciales para la subsistencia. Posteriormente, con la incorporación de técnicas ancestrales como el barequeo, se amplió su función económica mediante el aprovechamiento de los minerales, utilizando la batea para separar los metales de la arena. Esta diversificación de usos no solo fortaleció las economías locales, sino que también profundizó la relación entre la comunidad y el río, que pasó a constituirse en un eje integrador de medios de vida, espacios de interacción social y prácticas culturales asociadas al trabajo colectivo. (García Jurado; Soto Urrea, 2023).

La minería artesanal, ancestral o barequeo consiste en la explotación de depósitos minerales a pequeña escala, en la que se utilizan métodos manuales transmitidos de generación en generación o con ayuda de equipos muy sencillos, por lo general elaborados por los mismos mineros, para la extracción de los metales (Robledo, 2019). Esta es la clase de minería (minería de subsistencia) que realizan las comunidades étnicas y los campesinos desde hace siglos. No obstante alrededor de 1970 se empezó a mecanizar la actividad minera mediante el uso de motobombas y ya en la década de los ochenta se evidenciaron las primeras dragas para extraer oro de manera ilegal, estas acciones fueron impulsadas por los grupos armados que vieron la posibilidad de financiar sus actividades ilícitas a través de la minería ilegal de oro, y contrario a lo que se supone debe traer el mejoramiento tecnológicos en las sociedades; la minería ilegal

desencadenó un problema socio ambiental, donde el aumento de homicidios, la pobreza y la contaminación, son la principal consecuencia (García Jurado; Soto Urrea, 2023).

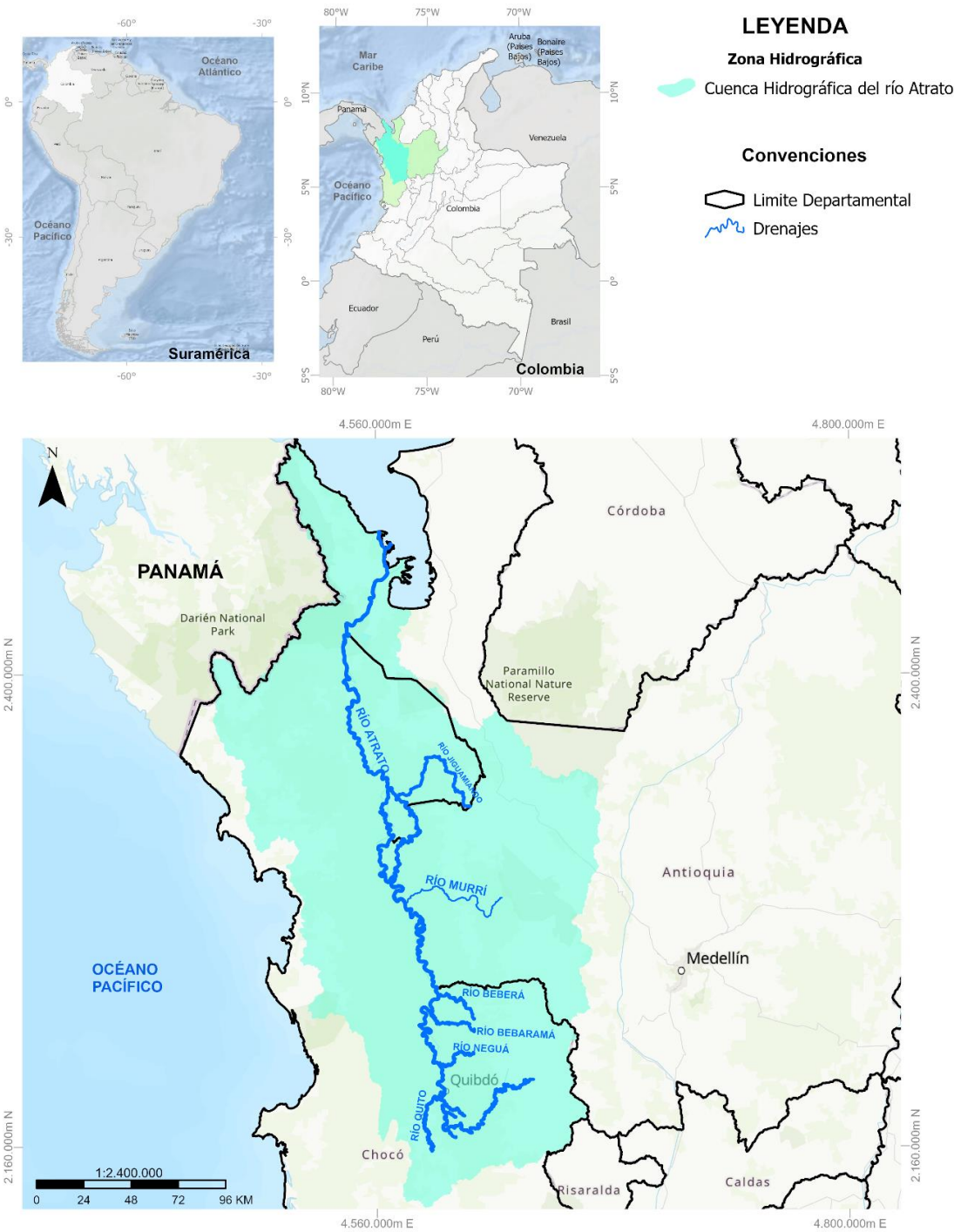
De acuerdo con la última proyección del Departamento Administrativo Nacional de Estadística (DANE) realizada en el año 2020, el Chocó presenta la más baja esperanza de vida al nacer a nivel nacional (60,2 años para hombres y 67,8 años para mujeres), estos aspectos están asociados a la pobreza extrema, fuertes limitaciones en el acceso a los servicios de salud y educación y, principalmente, a la presión social y económica que ejerce el conflicto armado en el territorio (Gobernación del Chocó, 2020). En esta investigación nos centraremos en el estudio de las amenazas y vulnerabilidad socioambiental relacionada con la contaminación del agua por metales pesados en una subcuenca hidrográfica denominada río Quito, la cual hace parte de la cuenca del río Atrato, mencionada anteriormente.

El río Atrato es un sistema hídrico complejo, tanto por sus características físicas, geográficas y ecosistémicas, como por sus valores, cultura, ancestralidad y potencial industrial. El río es considerado uno de los más caudalosos del mundo pudiendo alcanzar descargas de 5000 m³/s, nace en la cordillera occidental en los altos de la Concordia y los Farallones del Citará, sobre una cota de 3.700 m.s.n.m., en el municipio del Carmen de Atrato, en el departamento del Chocó (Ahmad, 2023). Este río es la principal vía fluvial para el transporte de productos y personas hacia el mar Caribe y es muy importante para la economía del departamento del Chocó, debido a que es una cuenca rica en metales preciosos como el oro y sus suelos son aptos para la agricultura, ganadería y el aprovechamiento de maderas. Al río Atrato desembocan ríos como: Quito, Yuto, Chagratará, Samurindó, Tanando, Tocolloró, Neguá, Bebará, Bebaramá, Murri, Jiguamiandó, entre otros, donde a su vez también se realizan actividades de minería aluvial de oro (OFICINA DE LAS NACIONES UNIDAS CONTRA LA DROGA Y EL DELITO, 2016). El Mapa 2 presenta los principales afluentes del río Atrato, resaltando la subcuenca del río Quito.

La región del Atrato, en el departamento del Chocó, ha sido históricamente afectada por múltiples problemáticas socioambientales y económicas. Entre las más relevantes se encuentran el conflicto armado, la violencia estructural y la degradación ambiental generada por la minería ilegal de oro. Estas condiciones representan un entorno adverso para las comunidades atrateñas, limitando sus oportunidades de desarrollo y bienestar. Como consecuencia, se ha configurado un contexto de insatisfacción y protesta social frente a los actores que han ejercido el poder político en el territorio y que, por acción u omisión, han

permitido la vulneración sistemática de derechos sociales y ambientales. (Mena; Aguilón, 2025; Rogelis Rincon et al., 2022).

Mapa 2. Cuenca del río Atrato



Fuente: Elaboración propia (2025)

Como resultado de una reclamación estructurada y organizada por parte de las comunidades, orientada al restablecimiento de derechos históricamente vulnerados, la Corte Constitucional de Colombia emitió un fallo sin precedentes en materia de justicia ambiental. En dicha decisión, reconoció la existencia de la grave vulneración de los derechos fundamentales a la vida, la salud, el agua, la seguridad alimentaria, el medio ambiente sano, la cultura y el territorio de las comunidades étnicas que habitan la cuenca del río Atrato y sus afluentes. Esta situación fue atribuida a la conducta omisiva de las entidades estatales, al no proporcionar una respuesta institucional adecuada, articulada y efectiva frente a las múltiples problemáticas estructurales de la región (Rogelis Rincon et al., 2022; Wesche, 2021).

En consecuencia, mediante la Sentencia T-622 de 2016, la Corte decidió reconocer al río Atrato como sujeto de derechos, con el fin de garantizar su protección, conservación, mantenimiento y restauración. Esta decisión implicó la formulación de órdenes dirigidas tanto al Estado como a las comunidades étnicas, para la implementación de planes de acción orientados a la superación de los conflictos socioambientales que afectan históricamente a esta región, los cuales se han intensificado en años recientes por la expansión de la minería ilegal (Corte Constitucional de Colombia, 2016). Esta decisión reconoce una debilidad estructural en la implementación de la legislación ambiental en Colombia, y específicamente en la región del Atrato, toda vez que, no se ha podido evitar la dinámica de vida y realidad social compleja de esta población, por tanto, son necesarios nuevos enfoques jurídicos para sortear y dinamizar los cambios ecológicos demandados por las comunidades (Wesche, 2021).

El nuevo constitucionalismo de la naturaleza plantea la concesión de derechos fundamentales a entidades no humanas, reconociéndolas como sujetos de derecho. Entre sus fundamentos jurídicos se encuentra el derecho consuetudinario de los pueblos indígenas, que perciben los ecosistemas naturales, como ríos o montañas, como seres vivos (González-Serrano, 2025). Además, establece que todas las formas de vida tienen derecho a existir, persistir, mantener y regenerar sus ciclos vitales, siendo el ser humano garante y responsable porque eso suceda. Una de las mayores críticas a la legislación ambiental tradicional es que no tiene en cuenta los daños al medio ambiente de manera directa, sino, los daños humanos relacionados con el medio ambiente (Wesche, 2021).

El río Atrato fue la primera entidad no humana reconocida como sujeto de derechos en Colombia y el proceso inició cuando los resultados de diversos estudios toxicológicos evidenciaron la existencia de un riesgo a la salud debido a la ingesta de agua contaminada con

metales pesados y la inhalación de vapores de mercurio, atribuyéndosele a este suceso la muerte de niños y adultos y el aumento de casos de intoxicación y de enfermedades como el cáncer. Por ello, el Centro de Estudios para la Justicia Social “Tierra Digna” en representación de las comunidades étnicas de la cuenca del río Atrato interpuso una tutela contra instituciones gubernamentales de orden local y nacional, argumentado que existe un uso intensivo y a gran escala de métodos de extracción minera y de explotación forestal ilegales en la cuenca del río Atrato, los cuales ocasionan pérdida de la biodiversidad, degradación del paisaje y afectan la riqueza cultural y étnica de la región. Añadiendo que, es una situación denunciada en múltiples ocasiones, sin respuestas del Estado concretas para su solución (Rogelis Rincon et al., 2022).

Los procesos de contaminación y degradación ecológica asociados con la minería ilegal se están generando con el poder destructor de los “dragones” y maquinaria amarilla, como retroexcavadoras y, con el uso de sustancias tóxicas como mercurio y cianuro, elementos que han alcanzado varios afluentes, humedales, ciénagas y cuencas que nutren al río Atrato contaminando la fauna acuática (Ruiz et al., 2019). Según Salazar-Camacho (2020) las concentraciones de Hg en peces del río Atrato y río Quito, superan el límite de la OMS (0,5 µg/g), y los factores de contaminación indican contaminación moderada en el 44% de los sitios muestreados en su investigación (Salazar-Camacho et al., 2020a). La minería ilegal también remueve la arena y sedimentos del lecho del río ocasionando alteraciones en la dinámica hidráulica que afectan la navegabilidad; por su parte, la deforestación en la ribera del río aumentó la intensidad de los procesos erosivos y con ello la concentración de sólidos y la turbidez del agua (Marrugo-Negrete et al., 2023a).

La dinámica socioambiental y económica en la cuenca del río Atrato y específicamente en río Quito se ha convertido en un estudio de caso para el análisis de la eficiencia de los instrumentos de planificación y gestión del territorio y de los recursos naturales que existen en Colombia. El hecho de que los procesos degradativos ocasionados por la minería ilegal y los impactos a la salud del ecosistema y la salud humana se hayan comprobado, perpetuado y aún peor, continúen paulatinamente agravándose, desenmascaró el crítico escenario de vulnerabilidad en el que se encuentra la cuenca hidrográfica. Incluso con medidas de emergencia como la declaración del río Atrato como sujeto de derechos, continúa siendo un desafío el control de la amenaza y hay incertidumbre sobre cómo lograr disminuir las condiciones que hacen vulnerable desde el punto de vista ecológico, social y económico a esta región tan importante del país.

1.3. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA DE INVESTIGACIÓN

La actividad minera en el Chocó se remonta al siglo XVII y su técnica extractiva ha ido escalando de técnicas artesanales a una minería de mayor explotación con ayuda de maquinaria y los llamados “dragones”, lo que ha implicado la alteración de la dinámica hidráulica del cauce y su llanura de inundación (Gallo, 2017). Principalmente se resalta la extracción de oro (26,3% de la producción total de oro en Colombia) y platino, aunque existen yacimientos de minerales como cobre, manganeso, cromo, zinc, antimonio, carbón, azufre, calizas, agregados y rocas ornamentales; algunos de ellos actualmente en explotación (OCDE, 2017).

La presencia y amplia extensión de la minería ilegal en la cuenca del río Atrato es un factor contrario a los propósitos de conservación que requiere el Chocó Biogeográfico y deriva un sinnúmero de conflictos ambientales, ecológicos y socioeconómicos en la población. A continuación, se describe la situación problema evidenciada en cada uno de los ámbitos anteriormente mencionados.

1.3.1. Problemática ambiental y ecológica

La minería de oro desarrollada en la cuenca del río Atrato genera vertimientos que contaminan el agua. En muchos casos, esos vertimientos, contienen trazas de metales pesados con potencial de generar riesgo eco-toxicológico, los metales pesados se incorporan a los sedimentos y a partir de ellos se acumulan en la biota, llegando a los humanos a través de la cadena trófica (Palacios-Torres; De La Rosa; Olivero-Verbel, 2020). Algunos tipos de minería que se desarrollan en el río Atrato utilizan el mercurio para formar amalgama con el oro, la cual posteriormente se quema liberando vapores de este metal altamente tóxicos que afectan la calidad del aire, la salud ambiental y humana (Palacios-Torres; Caballero-Gallardo; Olivero-Verbel, 2018).

Durante la extracción de oro mediante minería aluvial ilegal y mecanizada como la que se presenta en el río Atrato y especialmente en río Quito, los impactos al medio ambiente, son de alta magnitud por su intensidad y extensión. Algunas investigaciones han demostrado que existe afectación sobre los suelos y depósitos de las terrazas aluviales, provocando erosión y aumentando el transporte de sedimentos, lo que conlleva a un cambio en el funcionamiento del sistema hídrico dada la disminución del nivel freático y aparición de zonas de oxidación que aumentan la intensidad de los cambios en minerales primarios y arcillas, y reducen la cristalización de estas últimas (Gaviria; Angel-Amaya, 2020).

En cuanto a toxicología del agua un estudio realizado por la Universidad de Córdoba en el río Quito entre el año 2021 y 2023, mostró valores elevados de turbidez, sólidos suspendidos y nitratos, así mismo evidenció presencia de mercurio en zonas de la cuenca alta en donde se concentra la mayor actividad minera ilegal (Universidad de Córdoba; Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible; Fondo Colombia en Paz, 2023). La minería aluvial ha inducido alteraciones sustanciales en la dinámica hidro-sedimentológica del río, asociadas a procesos de deforestación en zonas ribereñas, lo cual ha incrementado las tasas de sedimentación y provocado una disminución en la biodiversidad íctica (Palacios-Torres; De La Rosa; Olivero-Verbel, 2020). La contaminación en sedimentos por Arsénico (As), Cromo (Cr), Cobre (Cu), Níquel (Ni) y Cadmio (Cd) ha sido demostrada mediante el cálculo de índices de riesgo ambiental (Palacios-Torres; De La Rosa; Olivero-Verbel, 2020).

De acuerdo con el profesor Nick Mount, quien realizó en el año 2020 un estudio conceptual sobre los impactos a la geomorfología en el río Quito, se evidenció que la minería de oro ha aumentado de manera significativa la turbidez del río, incrementando hasta 16 veces el valor de ésta con respecto a los niveles previos (Mount, 2020). Por otra parte, resaltó que la minería ha cambiado fundamentalmente la forma del cauce del río a lo largo de toda su longitud, transformando el canal de tipo serpenteante estable en una forma de multifilamento artificial con una alta tasa de encallamiento (Mount, 2020). Así mismo, se presentan modificaciones del lecho del río debido al uso de la maquinaria pesada, lo que ha conllevado a la desaparición de zonas boscosas, cambios fisicoquímicos en las propiedades del suelo y la acumulación de bancos de arenas sobre las márgenes del río (Mount, 2020). Todas estas modificaciones han impactado negativamente la biodiversidad y el equilibrio ecológico de los ecosistemas, reduciendo su capacidad para mantener la oferta de servicios ecosistémicos que requieren las comunidades habitantes en la cuenca, especialmente la seguridad e inocuidad alimentaria (Asprilla; Centeno, 2023).

Otras investigaciones en la cuenca del río Atrato han evidenciado la presencia de concentraciones de mercurio en peces por encima de los niveles considerados seguros para el consumo humano, así como la existencia de múltiples áreas con niveles de contaminación clasificados como moderados o altos (Salazar-Camacho et al., 2020a). Por su parte, Palacios-Torres et al (2020) determinó el cociente de peligrosidad (HQ) a partir de la toma de muestras en peces a lo largo del río Atrato, indicando que varias especies no debían consumirse debido a su contenido en Arsénico (Palacios-Torres; De La Rosa; Olivero-Verbel, 2020; Palacios-Valoyes; Salas-Moreno; Marrugo-Negrete, 2024; Salazar-Camacho et al., 2020a, 2021a), el

cual es un Elemento Potencialmente Tóxico (EPT) que se libera por la remoción mecánica de sustratos del lecho del río durante la minería aluvial. En este sentido, el consumo de peces y otros alimentos contaminados por metales pesados en el río Atrato, representan un riesgo a la salud humana debido a alteraciones en el sistema nervioso y efectos deletéreos sobre el sistema renal, pulmonar, cardiovascular, digestivo e inmunológico (Bernhoft, 2012; Caicedo-Rivas; Salas-Moreno; Marrugo-Negrete, 2022; Córdoba-Tovar et al., 2023a).

1.3.2. Problemática socioeconómica y cultural

El departamento del Chocó está permeado en todo su territorio por la presencia constante del narcotráfico, la guerrilla, los paramilitares y el ejército colombiano. La zona ha sido escenario de secuestros, campo de batalla entre los grupos armados, discriminación racial y desplazamiento forzado, entre otras complejas situaciones que conllevan a la constante vulneración de derechos fundamentales. Debido a estos sucesos y a su divulgación en medios de comunicación, la mayor parte de la población colombiana percibe al departamento del Chocó como una región violenta, lejana, abandonada, atrasada e insegura (Lara Rodríguez; Tosi Furtado; Altimiras Martin, 2019) en lugar de, una región biodiversa y de riqueza social y cultural.

La degradación social que padece el departamento del Chocó data de la época de la Colonia, cuando los negros esclavizados perecían en las minas de la región y se ha intensificado tras la lucha por el dominio del Oro presente en los ríos, especialmente en la cuenca del río Atrato (Echavarría-Rentería; Hinestroza-Cuesta, 2021). Las injusticias sociales que se dan en esta región obedecen al aumento de relaciones de exclusión y desigualdad de carácter estructural, situaciones que evidencian racismo, discriminación, abuso, expropiación y acaparamiento de oportunidades, generando múltiples barreras de dominación que obstaculizan la igualdad de oportunidades.

El confinamiento y desplazamiento forzado de las comunidades étnicas evidencian la presencia de diversos actores armados del territorio, los originarios se encuentran agobiados, intimidados y perseguidos por grupos como el Ejército de Liberación Nacional (ELN), las disidencias de las Fuerzas Armadas Revolucionarias de Colombia – Ejército del Pueblo (FARC-EP), grupos paramilitares y criminales. En este sentido, la intensidad del conflicto armado a nivel territorial golpea los procesos de resistencia social, afecta la gobernanza autónoma de las etnias y fragiliza la estructura organizativa de las comunidades y su desarrollo

(Echavarría-Rentería; Hinestroza-Cuesta, 2021; Otálvaro-Marín; Parra-López; Klinger-Cundumí, 2023).

A pesar de que la minería de oro ha sido realizada por las comunidades afro e indígenas que habitan en la cuenca del río Atrato, quienes han transmitido los conocimientos en *minería de subsistencia*¹ a sus descendientes de generación en generación. Hoy en día resulta evidente la transformación cultural de los medios de vida tradicionales en el Chocó, siendo permeados por una mezcla cultural inmigrante, violenta y opresiva en la cual intervienen arraigos y costumbres enfocadas en la extracción insostenible de los recursos naturales para el aumento de los beneficios económicos mediante la *minería ilegal*² y *criminal*³ (Sabogal, 2012).

Como consecuencia de todos estos conflictos socioambientales y económicos, la población del Chocó posee condiciones de bienestar y calidad de vida desfavorables, ubicándose en los últimos lugares del país. Existen dificultades para acceder a servicios básicos como agua potable, saneamiento básico, manejo y disposición final adecuada de residuos peligrosos, limitado acceso a condiciones de salud dignas y acordes a las problemáticas del territorio, limitada participación ciudadana en la formulación de políticas sociales y económicas, así como problemas asociados a la cultura política transversalmente manchada con casos de corrupción, cacicazgos y familias políticas financiadas por estructuras criminales (Echavarría-Rentería; Hinestroza-Cuesta, 2021).

Las fuentes hídricas del departamento del Chocó se han visto gravemente afectadas por los procesos de contaminación asociados a la minería ilegal, lo cual ha generado impactos directos en la vida cotidiana y las prácticas socioculturales de las comunidades ribereñas. La relación estrecha y ancestral que estas poblaciones mantienen con los ríos —como eje articulador de su subsistencia, cultura y organización territorial— se ha visto deteriorada, afectando no solo su seguridad hídrica, sino también sus tradiciones y formas de vida colectiva.

¹ Es la actividad minera desarrollada por personas naturales o grupo de personas que se dedican a la extracción y recolección, a cielo abierto, de arenas y gravas de río destinadas a la industria de la construcción, arcillas, metales preciosos, piedras preciosas y semipreciosas, por medios y herramientas manuales, sin la utilización de ningún tipo de equipo mecanizado o maquinaria para su arranque (Ministerio de Minas y Energía, 2016)

² Es una actividad minera desarrollada de manera artesanal e informal, al margen de la ley. También incluye trabajos y obras de exploración sin título minero. Incluye minería amparada por un título minero, pero donde la extracción, o parte de ella, se realiza por fuera del área otorgada en la licencia (Ministerio de Minas y Energía, 2003).

³ Es la actividad minera desarrollada por grupos armados organizados al margen de la ley, en territorios donde el Estado no llega y los actores criminales son quienes ejercen el control, este tipo de minería además de ser ilegal torpedea el control y la administración de los recursos del Estado y, en esa medida, genera un enorme costo social, toda vez que afecta las fuentes de empleo, de ingresos tributarios y, los que es más grave, menoscaba descontroladamente la oferta ambiental, corazón de la subsistencia de una comunidad (Gómez, 2021).

La degradación de estos ecosistemas representa, por tanto, una amenaza estructural para el tejido social de las comunidades asentadas en sus márgenes (Defensoría del Pueblo, 2016; Melo-Ascencio, 2024).

Los vertimientos de aguas residuales provenientes de la minería ilegal pueden estar contaminados con mercurio y otros EPT, ya que a pesar de su prohibición a partir de la expedición de la Ley 1658 de 2013, el mercurio aún continúa siendo usado en la minería ilegal (Rogelis Rincon et al., 2022). Además, la remoción del sustrato del lecho del río durante el dragado puede ocasionar la resuspensión de metales pesados alojados en los sedimentos o liberar otros metales presentes en la composición geoquímica de las rocas, ocasionando un riesgo eco-toxicológico que puede desencadenar problemas de salud pública (Marrugo-Negrete et al., 2023a; Marrugo-Negrete; Benitez; Olivero-Verbel, 2008).

Teniendo en cuenta el contexto descrito anteriormente, se plantea la siguiente pregunta problema para el desarrollo de esta investigación: ¿Cómo se estructuran herramientas, instrumentos o modelos para la gestión de riesgos socioambientales, integrando la amenaza asociada a la contaminación por metales pesados y la vulnerabilidad socioambiental de esta cuenca hidrográfica afectada por la minería de oro ilegal?

1.4. JUSTIFICACIÓN

Un ecosistema es un complejo dinámico de comunidades vegetales, animales, microorganismos y del medio, que interactúan como una unidad funcional y se interrelacionan con el ser humano. Por su parte, los servicios ecosistémicos son los beneficios que las personas obtienen de los ecosistemas, entre estos se encuentran los servicios de aprovisionamiento como alimentos, agua, madera y fibra; servicios de regulación asociados con el clima, la contención de inundaciones, las enfermedades, la disposición final de residuos y la calidad del agua; servicios culturales que proporcionan beneficios recreativos, estéticos y espirituales; y servicios de apoyo como la formación del suelo, la fotosíntesis y el ciclo de los nutrientes (Millennium Ecosystem Assessment Panel, 2005). Considerando lo anterior, puede inferirse que la existencia de la especie humana depende de la continuidad y estabilidad en la prestación de esos servicios ecosistémicos y que, la ausencia de alguno de ellos podrá desestabilizar el desarrollo socioeconómico y ambiental de las comunidades y aumentar su vulnerabilidad ante diferentes amenazas.

El estado de la cobertura de la tierra en la cuenca del río Quito indica una alta presión en la vegetación de la ribera del cauce principal y sus afluentes debido a la minería aluvial, generando el deterioro de la red de drenaje al modificar sus cauces y de la fauna y flora al disturbar sus ecosistemas (Asprilla Mosquera, 2019), disminuyendo la oferta de servicios ecosistémicos. Entre los principales servicios afectados se encuentra el suministro de agua tanto para el consumo humano, como para el desarrollo de diferentes actividades económicas: minería artesanal, de arrastre y mecanizada, y cultivos de plátano, banano, yuca, piña y lulo (Jimenez-Ortega et al., 2020). El transporte fluvial, es un servicio ecosistémico fundamental para las comunidades que habitan esta cuenca, la fuga de agua mediante los canales que deja la minería implica la disminución del nivel del agua en el cauce principal lo afecta este servicio. Además, la inexistencia de vías terrestres para el desplazamiento hacia todos los sitios genera dependencia al río como principal vía de transporte. Las afectaciones geomorfológicas, hidrológicas y fisicoquímicas derivadas de la minería ilegal suponen un alto riesgo para la continuidad y equilibrio de estos servicios ecosistémicos esenciales (Jimenez-Ortega et al., 2020).

La sentencia T-622 de 2016 declaró al río Atrato y sus afluentes como sujeto de derechos otorgándoles una mayor relevancia jurídica y protección superior con el fin de promover la justicia ecológica en la región del Chocó (Cano Franco, 2017). Esta sentencia estableció que el río tiene derechos propios, lo que incluye el derecho a la conservación y restauración, y asigna a las comunidades y al Estado la responsabilidad de garantizar su cumplimiento. La medida, responde a la necesidad de mitigar la profunda crisis socio ecológica derivada de la minería de oro mecanizada generando la formulación de un plan de acción para descontaminar el río, recuperar sus ecosistemas y evitar daños adicionales al ambiente, este plan de acción tuvo como subcuenca priorizada al río Quito (Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible, 2019) debido a la evidente degradación geomorfológica del cauce. Esta tesis doctoral es un insumo técnico esencial para viabilizar la implementación del plan de acción, donde se estableció la necesidad del estudio de la contaminación por metales pesados como base para definir estrategias de remediación ambiental, así como el estudio hidráulico y de geomorfología fluvial para establecer la alteración morfológica del cauce y proponer acciones para su rehabilitación; analizar estos insumos en función de la amenaza y vulnerabilidad socioambiental y generar recomendaciones y propuesta metodológicas que aborden el uso de indicadores, herramientas e instrumentos innovadores será importante para la toma de decisiones sobre la gestión integral y de riesgos en esta cuenca hidrográfica. Esta

tesis doctoral presenta información relevante para la estructuración de instrumentos de gestión acordes a la complejidad del sistema socioambiental y, sus conclusiones y recomendaciones, podrán ser escaladas y aplicadas en otras cuencas hidrográficas afectadas por actividades antrópicas como la minería legal e ilegal.

Los indicadores convencionales de contaminación hídrica por metales pesados se basan en medir las concentraciones de contaminantes (Hg, Pb, Cd, entre otros) frente a normas y en índices fisicoquímicos sintéticos. Por ejemplo, en estudios colombianos se han empleado el Índice de Calidad del Agua (ICA) y el Índice de Contaminación por Metales Pesados (HPI) para establecer la carga de metales en ríos, obteniéndose valores elevados que indican contaminación (Khanna, 2000; Marsiglia Lans et al., 2023).

No obstante, los indicadores actuales se centran en variables fisicoquímicas y riesgos toxicológicos, sin incorporar plenamente las dimensiones socioeconómicas y ecológicas que implica la amenaza por contaminación. La cuenca del río Quito ejemplifica esta necesidad de enfoque holístico en la gestión de riesgos socioambientales. La minería aurífera ilegal ha provocado que el agua y sedimentos se encuentren contaminados con metales pesados, con graves impactos en la salud pública y en la economía local (Marrugo-Negrete et al., 2023a). Frente a esta realidad, se hace necesario desarrollar una estructura sistémica que proponga la integración de métricas ambientales, sociales y económicas en la evaluación de cuencas afectadas. En línea con las tendencias internacionales de desarrollo sostenible, organismos como la OCDE promueven indicadores ambientales multidimensionales que articulan variables económicas, sociales y ecológicas (Rodríguez Miranda; Vial Cossani; Alejandra Parrao, 2021).

El diseño de una estructura sistémica e integral para gestionar los riesgos socioambientales por metales pesados en la cuenca del río Quito será fundamental para la toma de decisiones desde la perspectiva ambiental, social, sanitaria y económica. Esto permite identificar zonas y poblaciones prioritarias, orientar eficientemente los recursos y diseñar intervenciones más contextualizadas y eficientes. En el caso del río Quito, por ejemplo, el Plan de Ordenamiento del Recurso Hídrico formulado para el cauce se ha visto limitado en cuanto a su implementación, en gran parte, debido a que los instrumentos de gestión se han enfocado predominantemente en aspectos técnicos y normativos puntuales, como la calidad fisicoquímica del agua o la identificación de cargas contaminantes, sin integrar adecuadamente las dimensiones sociales, culturales, ecológicas y económicas del territorio. Esta visión

desconoce las dinámicas comunitarias, la afectación diferencial sobre los medios de vida locales y la interdependencia entre los ecosistemas acuáticos y las prácticas culturales. Como resultado, las medidas propuestas carecen de apropiación por parte de las comunidades, y no encuentran respaldo en las prioridades de inversión de los gobiernos a nivel local, regional y nacional. Para que estos planes trasciendan el papel, es necesario diseñar enfoques que reconozcan la complejidad socioambiental de la cuenca y promuevan la participación vinculante de los actores territoriales en todas las fases del proceso, dejando ver la conexidad que existe entre los impactos ambientales y el desarrollo social y económico de los territorios.

A continuación se presenta una tabla resumen de identificación de los impactos socioambientales relacionados a la actividad de minería aluvial que se presenta en la cuenca del río Atrato.

Tabla 1. Resumen de impactos ambientales asociados a la minería aluvial en el río Atrato

Dimensión	Impacto socioambiental
Ambiental	Alteración del régimen hidrológico
	Alteración de la geomorfología fluvial
	Contaminación del agua
	Contaminación del suelo
	Incremento de la erosión
	Pérdida de la cobertura edáfica
	Aumento del riesgo de desastres
Diversidad biológica	Pérdida de biodiversidad
	Migración de fauna
	Pérdida de hábitats naturales
	Aumento de la fragmentación de ecosistemas
	Contaminación de cadenas tróficas
	Proliferación de especies invasoras
	Interrupción de ciclos reproductivos y patrones de comportamiento
Social	Desplazamiento forzado y pérdida de territorio
	Deterioro de la salud pública
	Pérdida de la seguridad comunitaria
	Pérdida de la gobernanza territorial y ambiental
	Incremento de violencias basadas en género y explotación sexual
	Fragmentación del tejido social
Cultural	Transformación de valores y modos de vida comunitarios
	Pérdida de prácticas culturales y saberes ancestrales
	Pérdida de sitios sagrados o patrimoniales

Dimensión	Impacto socioambiental
	Debilitamiento de la relación e interacción con el territorio
Económica	Pérdida de medios de vida tradicionales
	Desviación de la economía local hacia actividades ilícitas
	Encarecimiento del costo de vida local
Institucional	Deterioro de infraestructura pública
	Deterioro de la gobernanza territorial
	Pérdida de credibilidad institucional ante la comunidad
	Debilitamiento de la autoridad ambiental y pérdida de control del territorio
Fuente: Elaboración propia (2025)	

2. OBJETIVOS

2.1. OBJETIVO GENERAL

Analizar los factores de amenaza y vulnerabilidad socioambiental asociada a la contaminación por metales pesados en la cuenca hidrográfica del río Quito (Chocó, Colombia) para desarrollar una estructura sistémica de gestión integral de riesgos.

2.2. OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Describir las interrelaciones etimológicas entre los conceptos de amenaza, vulnerabilidad y riesgo en el contexto de la contaminación por metales pesados;
- Identificar y caracterizar los indicadores, herramientas, instrumentos y modelos para el análisis de la amenaza, vulnerabilidad y riesgo asociado a la contaminación del agua con metales pesados;
- Analizar los factores que inciden en la amenaza y vulnerabilidad socioambiental asociada a la contaminación por metales pesados en la cuenca del río Quito;
- Elaborar una estructura sistémica para fortalecer los instrumentos de gestión de riesgos socioambientales asociados a la contaminación del agua por metales pesados en la cuenca del río Quito.

3. MARCO TEORICO Y CONCEPTUAL

3.1. METALES PESADOS Y CONTAMINACIÓN AMBIENTAL

Los metales altamente electronegativos con una densidad superior a 5 g/cm³ y número atómico mayor a 20 se denominan metales pesados, a excepción del arsénico que, aunque es más leve y no metálico, se asocia a este grupo debido a que genera efectos ecológicos semejantes (Agarwal, 2009). Estos elementos metálicos son componentes intrínsecos del medio ambiente. No obstante, aunque el valor de fondo de los metales pesados sea variable en el

mundo existen zonas con alta concentración debido a actividades antrópicas como la minería de oro que provoca contaminación por el uso de Hg para amalgamar el oro (Au) o la liberación de metales del material parental por diferentes procesos físicos y químicos llevados a cabo durante la extracción, llegando a los cuerpos de agua receptores, que a su vez pueden afectar otros ecosistemas por procesos de transporte y deposición de contaminantes (Lino et al., 2019; Marshall et al., 2018). En la siguiente tabla se presentan las fuentes antrópicas de los 8 EPT más comunes.

Tabla 2. EPTs asociados a fuentes antrópicas

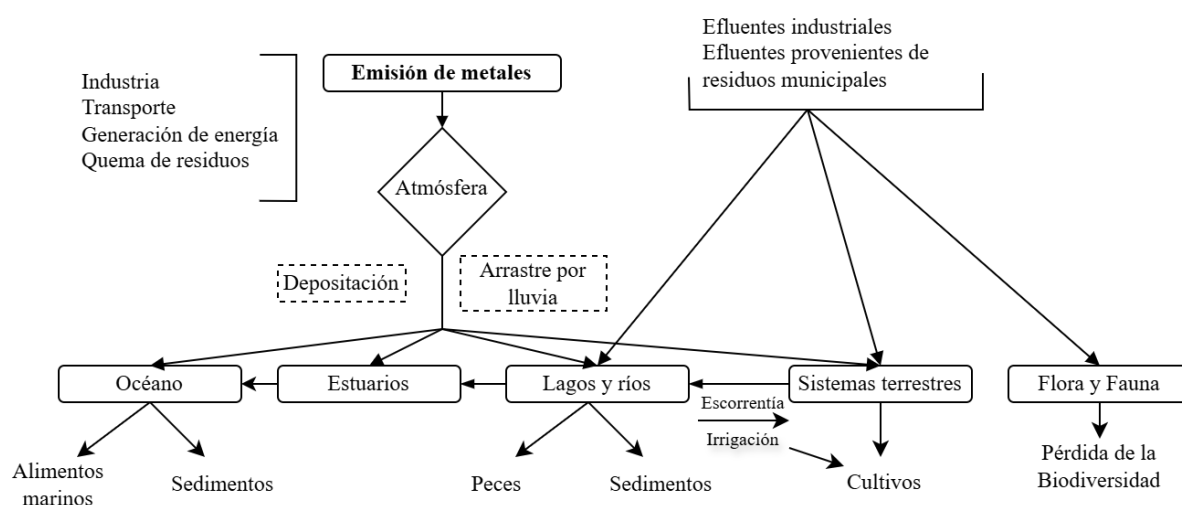
Fuente	As	Cd	Cr	Cu	Pb	Hg	Ni	Zn
Minería y procesamiento de minerales	+	+	-	+	-	+	-	+
Metalurgia	+	+	+	+	+	+	+	+
Industria química	+	+	+	+	+	+	-	+
Industria de aleaciones	-	-	-	-	+	-	-	-
Industria de pinturas	-	+	+	-	+	-	-	+
Industria del vidrio	+	-	-	-	+	+	-	-
Fábricas de pulpa y papel	-	-	+	+	+	+	+	-
Curtido de cuero	+	-	+	-	-	+	-	+
Teñido e impresión textil	+	+	-	+	+	+	+	+
Industria de fertilizantes químicos	+	+	+	+	+	+	+	+
Industria cloroalcalina	+	+	+	-	+	+	-	+
Refinación de petróleo	+	+	+	+	+	+	-	+
Quema de carbón	+	+	+	+	+	+	+	-

Fuente: Tomado de (Agarwal, 2009)

Diversos estudios han demostrado que estos metales son tóxicos para los seres vivos, incluso en pequeñas concentraciones. A diferencia de otros contaminantes, no se degradan en el medio ambiente, sino que se acumulan en los suelos, el agua y los organismos vivos a través de un proceso conocido como bioacumulación. De hecho, la contaminación por plomo (Pb), el arsénico (As) y el mercurio (Hg) es una preocupación ambiental mundial debido a su toxicidad y rápida acumulación en los sedimentos, que actúan como sumidero de estos contaminantes (Marrugo-Negrete et al., 2023b; Tamim et al., 2016). Uno de los problemas más graves asociados a la persistencia de los metales pesados es que pueden biomagnificarse en la cadena trófica y causar problemas de salud a los seres humanos (Singh; Kumar, 2017).

El transporte de metales pesados desde la fuente hasta los receptores y su reciclaje en el ecosistema depende de las condiciones topográficas, micro meteorológicas, de las características fisicoquímicas de los suelos, entre otros factores ambientales, no obstante, en todos los casos su estabilización por medios naturales requiere de mucho tiempo (Agarwal, 2009). El siguiente flujograma muestra cómo se da la dispersión de los metales pesados en el ambiente.

Figura 1. Dispersión de metales en el ambiente



Fuente: Tomado de AGARWAL, 2009

Una de las actividades antrópicas que más contribuye a la contaminación por metales pesados es la minería de oro, especialmente cuando esta se realiza de forma ilegal sin los debidos controles por parte de las autoridades ambientales de cada región, como es el caso de la minería practicada en la cuenca del río Quito. Durante la extracción de oro, los minerales metálicos, como los sulfuros de hierro, se exponen a la oxidación, lo que genera ácidos, como el ácido sulfúrico, que contribuyen a la generación de Drenaje Ácido de Minas. Esta acidez altera la calidad del agua y los suelos, afectando los ecosistemas cercanos (Agarwal, 2009).

La fragmentación mecánica de los minerales durante la excavación y molienda incrementa exponencialmente su superficie específica, intensificando los procesos geoquímicos de oxidación-reducción que transforman metales pesados a formas solubles y biodisponibles. Paralelamente, los lixiviados y residuos químicos generados en las operaciones extractivas pueden ser transportados por escorrentía hasta cuerpos de agua adyacentes, comprometiendo la calidad fisicoquímica y ecológica de estos sistemas. El drenaje ácido de minas, que a menudo contiene metales pesados, es una fuente importante de contaminación tanto del agua como del suelo (Agarwal, 2009; Marrugo-Negrete et al., 2023a).

3.2. TOXICOLOGIA Y MEDIO AMBIENTE

La toxicología es la ciencia que estudia los efectos adversos de sustancias químicas, biológicas o físicas sobre los organismos vivos, con el fin de comprender los mecanismos de acción, establecer relaciones dosis-respuesta y definir medidas de prevención y control. Esta disciplina es intrínsecamente interdisciplinaria, integrando conocimientos de química, biología, bioquímica, farmacología, ecología y estadística para identificar los riesgos asociados a la exposición a contaminantes. En el ámbito ambiental, la toxicología ha evolucionado hacia la evaluación de efectos crónicos de exposiciones a bajas concentraciones, considerando la persistencia y bioacumulación de compuestos como metales pesados, plaguicidas y contaminantes emergentes, que representan amenazas tanto para la salud humana como para los ecosistemas. Los estudios toxicológicos contribuyen a prevenir impactos irreversibles en cuencas afectadas por minería ilegal y orientan la toma de decisiones hacia una gestión sostenible del territorio (Gupta; Chanjta; Mehta, 2023).

3.3. LA AMENAZA DE LOS METALES PESADOS

La comunidad científica y las organizaciones ambientales y gubernamentales a nivel internacional han demostrado en numerosos estudios que la minería aurífera aluvial genera impactos desfavorables en los ecosistemas debido a la alteración de los procesos de sedimentación, agradación y erosión, la contaminación hídrica y de sedimentos con metales pesados, las afectaciones a los hábitats terrestres y acuáticos, la afectación a la fauna y flora y los impactos potenciales a la salud de las comunidades aledañas (Begani; Begani, 2017). Adicionalmente, una vez finaliza la actividad, los sitios de explotación suelen ser abandonados sin la adecuada implementación de las acciones de restauración ecológica pertinentes (Hilson, 2002).

La minería aluvial del oro implica la remoción intensiva de sedimentos y la alteración directa de los lechos fluviales, lo que provoca la liberación de metales pesados naturalmente presentes en los minerales y suelos, como arsénico, mercurio, plomo, cadmio, cromo y níquel. Esta exposición del material geológico al oxígeno y al agua desencadena procesos de oxidación de sulfuros metálicos (como la arsenopirita) y acidificación de los sedimentos, que favorecen la movilización y solubilización de estos elementos, transformándolos en formas químicamente activas y biodisponibles en los sistemas acuáticos y terrestres (Sleeman et al., 2019). La contaminación por metales pesados representa una amenaza ambiental para el río Atrato debido a los efectos ecotoxicológicos severos de estos elementos que pueden afectar la salud de los

ecosistemas y la salud humana. Además, la intervención física de los cauces, propia de actividades como la minería, provoca la fragmentación de hábitats naturales, incrementando la vulnerabilidad de las especies y su exposición a niveles críticos de contaminación (Caicedo-Rivas; Salas-Moreno; Marrugo-Negrete, 2022; Córdoba-Tovar et al., 2023a).

Entre los Elementos Potencialmente Tóxicos (EPTs), el Arsénico (As) se conoce como “el rey de los venenos”. Este metaloide penetra en el cuerpo humano por diversas vías, y la exposición crónica, incluso a niveles bajos, es suficiente para la aparición de síntomas tóxicos visibles debido al envenenamiento (Gupta et al., 2017). El arsénico está ampliamente distribuido en el ambiente, especialmente en suelos, agua, aire y biota marina. En el suelo, forma parte de varios minerales en forma de arseniatos, arseniuros, arsenitos, sulfuros, sulfosales, óxidos, silicatos y As elemental (Kumar, 2015; Nriagu et al., 2007). Varios factores regulan el transporte y la acumulación de As en las aguas subterráneas y superficiales, entre ellos la adsorción/desorción, la precipitación/disolución, el potencial redox, el pH, la concentración de iones competidores, la transformación biológica y la metilación. Se ha determinado, que las principales fuentes de As en el ambiente proceden de diversas actividades antropogénicas e industrias, como la generación de residuos sólidos (40%), las cenizas de carbón (22%), la minería, como la que ocurre en el río Atrato (16%), y las emisiones atmosféricas de la industria siderúrgica (13%) (Eisler, 2004; Gupta et al., 2017).

Por otro lado, la contaminación por Hg, derivada principalmente de la minería de oro artesanal e informal, representa una de las amenazas ambientales más severas en regiones de alta biodiversidad como el Chocó colombiano. Durante el proceso de recuperación de oro utilizando mercurio, este EPT es liberado al ambiente en forma elemental, contaminando de manera directa el suelo y los cuerpos de agua. Una vez en el medio acuático, este metal se transforma por acción microbiana en metilmercurio (MeHg), una forma orgánica altamente tóxica que se incorpora fácilmente a las cadenas tróficas a través del plancton. Desde allí, el MeHg se bioacumula y sufre biomagnificación en peces y otros organismos, alcanzando concentraciones progresivamente mayores en los niveles tróficos superiores, incluyendo a las poblaciones humanas que consumen peces contaminados. (Palacios-Torres; Caballero-Gallardo; Olivero-Verbel, 2018; Salazar-Camacho et al., 2020a). Otra vía de exposición corresponde al mercurio en estado gaseoso, liberado durante la quema de amalgamas en los procesos de extracción de oro (Calao-Ramos et al., 2021). Aunque el uso de este metal pesado está prohibido en actividades mineras, la ausencia de mecanismos efectivos de regulación y control impide garantizar su eliminación, especialmente en contextos de minería ilegal. La

contaminación por Hg compromete gravemente la salud de los ecosistemas acuáticos y terrestres, alterando las dinámicas ecológicas y amenazando la supervivencia de especies vulnerables. En el Chocó, una región donde convergen ocho zonas de vida y se concentra una alta diversidad biológica con numerosas especies endémicas de flora y fauna, la presencia de mercurio amenaza hábitats y ecosistemas estratégicos y compromete la provisión de servicios ecosistémicos esenciales (Salazar-Camacho et al., 2021a).

El plomo (Pb) es un metal pesado que se encuentra de forma natural en yacimientos minerales concentrados y se transfiere continuamente entre el aire, el agua y el suelo a través de procesos químicos y físicos naturales, como la meteorización, la escorrentía, la precipitación, la deposición seca de partículas y el flujo de arroyos y ríos. El suelo y los sedimentos actúan como sumideros importantes de este metal, debido a su fuerte capacidad de adsorción, independientemente de las propiedades fisicoquímicas del sustrato. Entre los factores que condicionan su comportamiento en el ambiente, la acidez del suelo es determinante, ya que influye significativamente en la solubilidad, movilidad y fitodisponibilidad del plomo (Prior et al., 2022).

La presencia generalizada de plomo en el ambiente se debe principalmente a actividades antrópicas, como la minería, la fundición, el refinado y el reciclaje de materiales que contienen este metal. A ello se suma su uso histórico en la gasolina con plomo y en combustibles de aviación, así como en la producción de baterías de plomo-ácido, pinturas, esmaltes, joyería, soldaduras y productos cerámicos. Aunque la utilización de plomo en combustibles ha disminuido notablemente en las últimas décadas, su persistencia en los suelos y sedimentos continúa representando una fuente relevante de exposición ambiental. Adicionalmente, el Pb se encuentra en residuos electrónicos y en antiguos sistemas de plomería (tuberías y soldaduras), y puede ser reintroducido a los ecosistemas por la re-movilización de depósitos históricos, especialmente en zonas con antecedentes de actividad minera (Martínez Macea, 2021; World Health Organization, 2017a).

Por su parte, el cromo (Cr) es un elemento metálico que se encuentra naturalmente en el ambiente, principalmente en suelos y rocas. De sus distintas formas de oxidación, las más relevantes son el cromo trivalente (Cr III) y el cromo hexavalente (Cr VI), que presentan diferencias marcadas en cuanto a movilidad, solubilidad y toxicidad. Mientras que el Cr III es poco soluble, se adhiere fácilmente a suelos y sedimentos y puede actuar como micronutriente

en bajas concentraciones, el Cr VI es altamente soluble en agua, móvil y tóxico, lo que lo convierte en una amenaza ambiental y a la salud humana (Kimbrough et al., 1999).

El cromo entra en los cuerpos de agua por procesos naturales como la meteorización de rocas, pero también por fuentes antrópicas como descargas industriales, lixiviación de suelos contaminados y deposición atmosférica. En el medio acuático, el cromo experimenta reacciones de oxidación, reducción, disolución y precipitación. La reducción de Cr VI a Cr III puede ocurrir en presencia de agentes reductores como materia orgánica, sulfuros e iones ferrosos, especialmente en condiciones ácidas, lo que reduce su toxicidad y movilidad. No obstante, bajo ciertas condiciones, como ambientes con óxidos de manganeso y pH alcalino, Cr III puede oxidarse nuevamente a Cr VI (Kimbrough et al., 1999; Zayed; Terry, 2003).

Desde el punto de vista toxicológico, el Cr VI es la forma más peligrosa, ya que atraviesa fácilmente las membranas celulares y ha sido clasificado como carcinógeno humano, asociado con cáncer pulmonar y daños hepáticos, renales y dérmicos. No obstante, el Cr III, puede volverse perjudicial si se encuentra en concentraciones elevadas (Oliveira, 2012).

El cadmio (Cd) es considerado un contaminante ambiental de alta peligrosidad debido a su toxicidad y persistencia. Este elemento suele obtenerse como subproducto durante la producción de zinc a partir del sulfuro de zinc (ZnS) y, frecuentemente, coexiste con otros metales como el plomo (Pb) y el cobre (Cu), debido a la similitud en sus propiedades geoquímicas (Charkiewicz et al., 2023). Una de las principales vías de introducción del cadmio en los suelos agrícolas es el uso de fertilizantes fosfatados, como los superfosfatos, los cuales pueden contener impurezas de este metal. Además, las emisiones industriales, incluyendo la minería y la fundición de metales, son fuentes que contribuyen a su acumulación en el ambiente. Esta contaminación ha sido documentada, por ejemplo, en cultivos de arroz expuestos a fuentes de Cd relacionadas con el uso de fertilizantes y pesticidas químicos (Zhao; Wang; Zhao, 2022)

Desde una perspectiva toxicológica, la exposición al cadmio representa un riesgo significativo para la salud humana. Diversos estudios han asociado la presencia de Cd con efectos adversos como nefrotoxicidad, alteraciones óseas, vómitos, diarrea, destrucción de mucosas, y enfermedades graves como el síndrome de Itai-itai. Asimismo, se ha reportado su interferencia con la producción hormonal, afectando los niveles de progesterona y testosterona (Godt et al., 2006; Piasek et al., 2023; Sánchez-Castellón et al., 2022)

El níquel (Ni) es un metal ampliamente distribuido en el ambiente de forma natural. Su liberación natural proviene de procesos como la actividad volcánica, la meteorización de rocas y los incendios forestales. En el agua, se moviliza por disolución de minerales y se encuentra como sales solubles o asociado con materia orgánica. En el suelo, su concentración varía según el tipo de roca madre y puede aumentar con la acidez (Begum et al., 2022).

Desde el punto de vista antropogénico, el níquel es liberado en forma de sulfuros, óxidos, silicatos y compuestos solubles, principalmente por la quema de combustibles fósiles, procesos metalúrgicos, manufactura de aleaciones, incineración de residuos peligrosos y vertimientos industriales y domésticos. En la atmósfera, las emisiones humanas duplican las naturales, destacando los combustibles fósiles como principal fuente. En el agua, los aportes provienen de procesos industriales, escorrentía e infiltración de lixiviados, registrándose concentraciones especialmente altas en aguas subterráneas ácidas. En el suelo, las fuentes antrópicas incluyen residuos industriales, cenizas de carbón, lodos y materiales de manufactura, afectando principalmente zonas urbanas y suelos agrícolas acidificados (Begum et al., 2022).

La toxicidad del níquel en plantas ocurre cuando su concentración supera los niveles óptimos requeridos para funciones fisiológicas básicas. El exceso de níquel interfiere con la absorción de hierro, provocando clorosis y necrosis, y afecta la actividad de enzimas y proteínas al desplazar metales esenciales como el magnesio. Esto interrumpe procesos como la fotosíntesis, la división celular y la germinación, reduciendo el crecimiento radicular, el área foliar y la estructura de tejidos vasculares (Calogiuri; Bonamonte, 2016).

En humanos, el níquel inhalado puede causar enfermedades respiratorias graves como fibrosis pulmonar, neumoconiosis y cáncer nasal o pulmonar, especialmente en trabajadores expuestos a polvos o vapores metálicos. También tiene efectos en el sistema renal, cardiovascular, inmunológico y reproductivo, además de causar dermatitis de contacto en personas altamente sensibles. Algunas formas solubles y compuestos como el níquel carbonilo son extremadamente tóxicos y carcinógenos (Begum et al., 2022; Costa, 1995).

3.4. GESTIÓN INTEGRAL DE RECURSOS HÍDRICOS EN COLOMBIA

La Gestión Integral de los Recursos Hídricos (GIRH) es un proceso que promueve el desarrollo y manejo coordinado del agua, la tierra y otros recursos relacionados, con el fin de maximizar el bienestar económico y social de manera equitativa sin comprometer la sostenibilidad de los ecosistemas vitales; la GIRH está basada en la idea de que los recursos

hídricos son un componente integral de los ecosistemas y un bien social y económico (GWP, 2013).

La GIRH se define como un enfoque que abarca todos los usos del agua, promoviendo su administración, aprovechamiento y conservación bajo la cuenca hidrográfica como unidad territorial de gestión. Este modelo prioriza la evaluación de los impactos generados por cada uso en las decisiones de distribución y manejo, con el fin de minimizar los conflictos entre ellos. Entre sus objetivos se incluyen garantizar la sostenibilidad del recurso hídrico mediante el equilibrio en su extracción, controlar la calidad del agua frente a descargas contaminantes y promover la implementación de soluciones integrales (GWP, 2013). La GIRH fortalece la gobernanza mediante la incorporación de herramientas técnicas y metodológicas que permiten evaluar y planificar el uso del recurso hídrico, fomentar la educación ambiental y apoyar decisiones informadas a través de enfoques integradores (Terra Cerezini et al., 2025).

En este contexto, Colombia diseñó e implementó la Política para la Gestión Integral del Recurso Hídrico, un instrumento estratégico que establece objetivos, metas, indicadores y líneas de acción para el manejo del recurso hídrico. Esta política busca proporcionar directrices unificadas para resolver la problemática actual del agua, promover su uso eficiente y asegurar su conservación como una riqueza natural esencial para el bienestar de las generaciones futuras (Ministerio de Ambiente, Vivienda y Desarrollo Territorial, 2010).

La Gestión Integral del Recurso Hídrico en Colombia, se da en cuatro pasos importantes: la planificación, administración, seguimiento y monitoreo, y finalmente el manejo de conflictos relacionados con el agua. La planeación comprende el diseño de instrumentos de planificación asociados al recurso hídrico, entre los cuales se destacan: los planes de gestión ambiental regional (PGAR), los planes de ordenación y manejo de cuencas hidrográficas (POMCA), planes de ordenamiento del recurso hídrico (PORH), planes de manejo ambiental de los ecosistemas más importantes en su jurisdicción (humedales, páramos, manglares), entre otros encaminados al establecimiento de metas para la conservación y uso sostenible del agua en los territorios del país. Por su parte, la administración, comprende los actores, normas, procedimientos e instrumentos regulatorios asociados con el uso del agua, tales como: concesiones de agua superficial y subterránea, permisos de vertimientos, permisos de ocupación de cauces, lechos y playas, entre otros que dependen de las autoridades ambientales regionales y nacionales para su adjudicación y funcionamiento. En tercer lugar, el seguimiento y monitoreo, esta etapa se realiza mediante el trabajo conjunto entre las autoridades ambientales

regionales y el Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales de Colombia, el cual tiene implementada una red de monitoreo del recurso hídrico en los principales ríos del país, aunque la red aún en el año 2025 requiere optimización e inversión para el aumento de su cobertura, es una herramienta clave para alimentar el Sistema de Información del Recurso Hídrico del país (Ministerio de Ambiente, Vivienda y Desarrollo Territorial, 2010).

Finalmente, la resolución de conflictos en la gestión de recursos hídricos y el uso del suelo enfrenta retos vinculados a factores normativos, ambientales y sociales. Los conflictos relacionados con el uso del suelo suelen originarse en el incumplimiento de normas establecidas por los planes de ordenación y manejo de cuencas hidrográficas (POMCAs) y los planes de ordenamiento territorial (POTs) municipales. Los conflictos asociados a la calidad del agua se deben a actividades económicas, procesos erosivos y la presencia de centros poblados, mientras que los conflictos por cantidad de agua se derivan de prácticas ineficientes en sectores agroindustriales y domésticos, captaciones ilegales y el reparto inequitativo. Para abordar estas problemáticas, las autoridades ambientales deben fortalecer la aplicación de la normativa vigente y promover programas de uso eficiente del agua en todos los sectores. Además, es crucial fomentar la participación de actores locales mediante espacios de diálogo que permitan la distribución equitativa del recurso, incorporando programas de restauración y conservación de cuencas para asegurar la sostenibilidad hídrica (Ministerio de Ambiente, Vivienda y Desarrollo Territorial, 2010).

Las etapas anteriormente descritas son la hoja de ruta para la implementación de la GIRH en Colombia y contribuyen para que el proceso de toma de decisiones sobre el recurso hídrico se base en el entendimiento holístico del ciclo hidrológico; la interacción del agua con los demás recursos naturales; el interés de los diversos usos y usuarios del agua y la visión económica y social del agua. Toda esta teoría, en ocasiones ha resultado difícil de aterrizar a las necesidades de los territorios y poblaciones, especialmente debido a su complejidad y diversidad ideológica y cultural, por tal motivo el uso de herramientas e instrumentos e gestión es esencial para evidenciar y materializar dichas acciones, mejorando también el acceso a la información, la facilidad de divulgación y finalmente, la apropiación de esta por parte de todos los actores involucrados (Cerezini; Hanai, 2017; Zaudio Rodriguez, 2012).

3.5. GESTIÓN DE RIESGO DE DESASTRES EN COLOMBIA

La existencia de un desastre supone la previa existencia de determinadas condiciones de riesgo que se materializaron en un momento y espacio determinado. En este sentido, el

riesgo, es definido como la probabilidad de desastres futuros y se constituye por la existencia e interacción de dos tipos de factores: amenaza y vulnerabilidad. Las amenazas, corresponden a condiciones físicas de peligro latente que se pueden convertir en fenómenos destructivos. Éstos pueden tener su origen en la dinámica natural o ser inducidos o causados por los seres humanos. Por su parte, la vulnerabilidad comprende distintas características propias o intrínsecas de la sociedad que la predispone a sufrir daños en diversos grados. Una población expuesta a los efectos de un fenómeno físico sufrirá más o menos daño de acuerdo con el grado de vulnerabilidad que presenta. El nivel de riesgo de una sociedad está relacionado con sus niveles de desarrollo y su capacidad de modificar los factores de riesgo que potencialmente lo afectan. En este sentido, los desastres pueden catalogarse como riesgos mal manejados, donde los factores de amenaza y vulnerabilidad coexisten en alta magnitud (Cardona, 2008).

Se entiende por gestión de riesgos al conjunto de elementos, medidas y herramientas dirigidas a la intervención de la amenaza o la vulnerabilidad, con el fin de disminuir o mitigar los riesgos existentes. Por naturaleza, la gestión del riesgo implica el proceso de prevención, por tanto, su implementación no se limita únicamente a la atención de emergencias y la reconstrucción, sino que, implica articular todos los tipos de intervención, dando una importancia relevante a la prevención-mitigación, con la idea de que las políticas preventivas conduzcan en el largo plazo a disminuir de manera significativa las necesidades de intervenir sobre los desastres ya ocurridos (Cardona, 2008; Colombia, 2012).

La gestión de riesgos debe trascender los factores físicos e incorporar un complejo proceso social cuyo objetivo último es la reducción o control del riesgo en la sociedad. Dicha gestión, toma como punto de partida la noción de que el riesgo como manifestación social es una situación dinámica, y por tal motivo las acciones implementadas para su gestión deben acomodarse a esa dinámica. Así, la magnitud del riesgo siempre estará en función de la magnitud de las amenazas y las vulnerabilidades asociadas a este, las cuales, de igual manera que el riesgo, constituyen condiciones latentes y dinámicas en la sociedad (Khan et al., 2016; Müller-Grabherr et al., 2014).

En Colombia la Ley 1523 de 2012, estableció que: La gestión del riesgo es una política de desarrollo indispensable para asegurar la sostenibilidad, la seguridad territorial, los derechos e intereses colectivos, mejorar la calidad de vida de las poblaciones y las comunidades en riesgo y, por lo tanto, está intrínsecamente asociada con la planificación del desarrollo seguro, con la

gestión ambiental territorial sostenible, en todos los niveles de gobierno y la efectiva participación de la población.

En este sentido, la normativa asociada a la gestión del riesgo indujo un cambio de paradigma en la forma de enfrentar la problemática asociada a los desastres. El enfoque de gestión por procesos permitió implementar la gestión en un sentido transversal, e incluyó así competencias y actividades que articulan a cada una de las entidades que integran el llamado Sistema Nacional de Gestión del Riesgo de Desastres. Así mismo, se establecieron los principios que enmarcan la implementación de esa gestión, dentro de los cuales se destacó el principio de protección, de participación, de interés público o social, de precaución, de sostenibilidad ambiental y el principio sistémico, los cuales denotan la integralidad que debe primar en la gestión de riesgos en el país. Por último, la ley le otorgó a Colombia un instrumento para lograr la implementación de la gestión del riesgo, el cual se denominó, Plan Nacional de Gestión del Riesgo de Desastres, que a su vez se debe desarrollar en los niveles departamentales y municipales, cuyo objetivo es orientar las acciones del Estado y de la sociedad civil en cuanto al conocimiento del riesgo, la reducción del riesgo y el manejo de desastres en cumplimiento de la Política Nacional de Gestión del Riesgo, que contribuyan a la seguridad, el bienestar, la calidad de vida de las personas y el desarrollo sostenible en el territorio nacional (Colombia, 2012; Unidad Nacional para la Gestión del Riesgo de Desastres, 2016).

3.6. GOBERNANZA DEL AGUA

La gobernanza del agua es un pilar fundamental para asegurar la sostenibilidad en un contexto caracterizado por el cambio climático, el crecimiento demográfico y las crecientes demandas de diversos sectores (Grupo Banco mundial, 2023). Frente a los desafíos del agotamiento y deterioro de los recursos hídricos, los paradigmas actuales de gestión proponen nuevos modelos que se relacionan precisamente con el concepto de gobernanza (Guerrero-de León et al., 2010), entendida como un proceso integral que va más allá de la gestión tradicional. Este modelo conecta las actividades económicas, sociales y culturales, al tiempo que considera los impactos sobre los sistemas físicos, bióticos y el ambiente. Además, la gobernanza del agua implica un conjunto de normas e instituciones que fomentan la participación de diversos actores, desde entidades gubernamentales y comunidades locales hasta el sector privado, en la toma de decisiones relacionadas con el uso, acceso y conservación de los recursos hídricos (Martínez; Reyna, 2012).

Una buena gobernanza del agua implica una gestión transparente, inclusiva y equitativa, con un enfoque que reconozca las interdependencias entre los sistemas hídricos, los ecosistemas y las necesidades humanas. (Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible, 2016) En este sentido, los principios de responsabilidad y sostenibilidad se integran como elementos transversales que orientan las acciones hacia el equilibrio entre la satisfacción de las demandas actuales y la preservación de los recursos para las generaciones futuras. Sin embargo, lograr este equilibrio representa un desafío significativo, ya que las presiones sobre el recurso hídrico están estrechamente vinculadas a factores económicos, sociales y ambientales que varían considerablemente entre regiones (Di Vaio et al., 2021).

A nivel global, la disponibilidad y calidad del agua están siendo amenazadas por prácticas insostenibles, como la sobreexplotación de acuíferos, la contaminación por actividades industriales y agrícolas, y la urbanización acelerada (Dinar, 2024). El departamento del Chocó no es ajeno a estas problemáticas, especialmente considerando los impactos de la minería aluvial y mecanizada en los ecosistemas hídricos de la región (Marrugo-Negrete et al., 2023a). Frente a este panorama, es imprescindible que la gobernanza del agua incorpore mecanismos de adaptación que respondan a las particularidades del contexto local, promoviendo soluciones basadas en la naturaleza, el uso eficiente del recurso y la innovación tecnológica (Angel-Amaya et al., 2019).

La participación comunitaria adquiere una relevancia estratégica dentro de los marcos de gobernanza del agua, al fortalecer los procesos de toma de decisiones y fomentar una gestión más eficiente, inclusiva y sostenible del recurso. En regiones como el Chocó, donde las comunidades rurales y ribereñas dependen directamente del agua para su seguridad alimentaria, la pesca, la agricultura, el transporte fluvial y el consumo humano, su involucramiento activo permite integrar conocimientos tradicionales con criterios técnicos y ambientales. Esto resulta particularmente crítico en contextos de contaminación por metales pesados, donde la definición de estrategias de mitigación y restauración requiere legitimidad social, coordinación interinstitucional y la validación de soluciones adaptadas a las dinámicas del territorio (Guerrero-de León et al., 2010).

La gobernanza del agua, entendida como un proceso multidimensional, no puede desvincularse de los patrones de desigualdad estructural ni de los conflictos asociados al acceso, uso y control del recurso. En este sentido, la justicia hídrica representa una dimensión central al abordar la exposición desproporcionada de comunidades vulnerables a la contaminación por

metales pesados y al acceso limitado a agua segura. Fortalecer la gobernanza en estos contextos implica mejorar los instrumentos de gestión, promover la equidad en la toma de decisiones y garantizar que las intervenciones en el territorio reconozcan y reparen las desigualdades históricas en cuanto a seguridad hídrica (Kojola; Pellow, 2021; Terra Cerezini et al., 2025).

3.7. RÍOS COMO SUJETOS DE DERECHO: ¿UN NUEVO INSTRUMENTO PARA LA GIRH EN COLOMBIA?

El Plan Nacional de Desarrollo de Colombia 2022-2026 establece como uno de sus pilares fundamentales el ordenamiento alrededor del agua. Este enfoque, aunque no representa una novedad histórica debido a la tradicional localización de asentamientos humanos cerca de fuentes hídricas, introduce una perspectiva sistémica que prioriza la sostenibilidad de la vida en las cuencas hidrográficas del país. La adopción de este marco requiere su incorporación como eje transversal en la política ambiental, llevando a su aplicación integral en todos los sectores económicos. Para lograrlo ya existen instrumentos que promueven la Gestión Integral del Recurso Hídrico en los territorios. Entre estos instrumentos los planes de manejo ambiental de microcuencas, los planes de ordenamiento de recursos hídricos y los planes de ordenamiento y manejo de cuencas hidrográficas son tal vez los más utilizados. Sin embargo, estos instrumentos, que están cargados de tecnicismo, parecen no ser suficientes para dar solución a los diversos conflictos por el uso del agua en Colombia (Departamento Nacional de Planeación, 2022; Ministerio de Ambiente, Vivienda y Desarrollo Territorial, 2010).

En el marco de las nuevas tendencias del derecho biocultural surgió en Colombia la necesidad de reconocer a la naturaleza como sujeto de derecho en sí misma, y posterior a ello, a ciertos elementos propios de sus ecosistemas como son los ríos. Que un río sea sujeto de derechos significa que adquiere la capacidad de gozar de derechos y de atribuirse obligaciones, por tanto, debido a una tutela interpuesta por comunidades étnicas de la cuenca del río Atrato, la Corte Constitucional, por medio de la Sentencia T-622 de 2016, declaró al río Atrato como sujeto de derechos, fundamentándose en el principio de precaución, el derecho constitucional a gozar de un ambiente sano y el derecho fundamental al agua (CORTE CONSTITUCIONAL DE COLOMBIA, 2016; RUIZ et al., 2019). A partir de este fallo, la Corte reconoció los efectos perjudiciales y nocivos que ha tenido el uso intensivo y a gran escala de los diversos métodos de extracción minera y de explotación forestal ilegal, que incluyen maquinaria pesada -dragas y retroexcavadoras- y el uso de sustancias altamente tóxicas -como el mercurio - en el río Atrato, sus ciénagas, humedales y afluentes, que están teniendo consecuencias nocivas e irreversibles

en el ambiente, afectando con ello, los derechos bioculturales de las comunidades étnicas y el equilibrio natural de los territorios que habitan (Cano Franco, 2017).

La sentencia sobre el río Atrato establece acciones para la descontaminación de su cuenca, la recuperación de los ecosistemas ribereños y la prevención de daños ambientales adicionales. Sin embargo, surge la inquietud de si estos objetivos pudieran haberse logrado mediante los instrumentos existentes en la Política Nacional para la Gestión Integral del Recurso Hídrico, sin necesidad de recurrir a la declaración del río como sujeto de derechos. O del por qué, esos instrumentos no han sido suficientes para lograr aquello para lo cual fueron diseñados.

Esta decisión también genera preocupación respecto a los criterios de priorización para asignar recursos económicos en la protección de cuencas hidrográficas igualmente o más afectadas por actividades antrópicas, pero que carecen de este tipo de reconocimiento. El precedente establecido en el caso del río Atrato podría incentivar movimientos similares en otras regiones del país, promoviendo la declaración de diversos entes naturales como sujetos de derechos. Esta tendencia plantea riesgos significativos para la capacidad operativa y económica del Estado, tanto a nivel nacional como regional, al dificultar la implementación efectiva de estas sentencias y la gestión equitativa de los recursos económicos disponibles.

3.8. FUNDAMENTOS DE LA VULNERABILIDAD SOCIOAMBIENTAL

La vulnerabilidad en territorios como la cuenca del río Atrato está estrechamente vinculada a los procesos sociales, económicos, culturales y ambientales que configuran sus sistemas de vida. En este contexto, la vulnerabilidad se entiende como el grado de susceptibilidad, fragilidad o falta de resiliencia de los sistemas sociales y ecológicos frente a amenazas externas, entre ellas la contaminación por metales pesados. Aunque la presencia de estos contaminantes constituye un hecho ampliamente documentado, el nivel de riesgo asociado depende de las condiciones específicas que hacen vulnerable al territorio y a sus habitantes (Cardona, 2001).

La identificación de los factores que modulan esta vulnerabilidad exige un enfoque integral, capaz de captar la complejidad de las dinámicas territoriales y los procesos históricos que las han configurado. No es suficiente con emplear indicadores aislados; se requiere el desarrollo de modelos o instrumentos que integren tanto los determinantes estructurales (dependencia económica de los recursos naturales, desigualdades sociales o las condiciones

sanitarias) como los mecanismos que traducen estos factores en condiciones inseguras. Este enfoque permite aproximarse a la comprensión integral de la vulnerabilidad, más allá de una visión limitada a la descripción (Cardona, 2001).

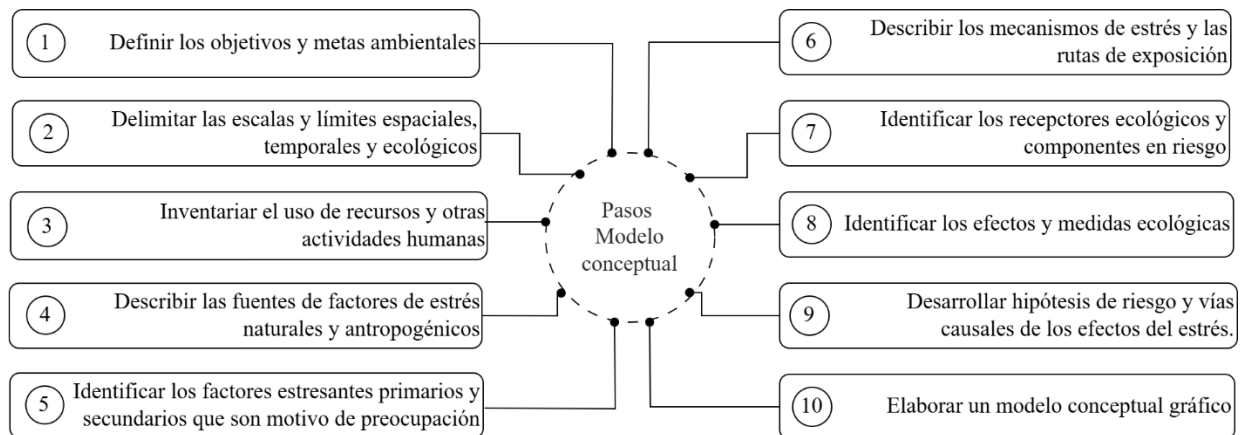
La minería ilegal representa uno de los principales factores que amenazan la cuenca, conllevando a transformaciones físicas del sistema hídrico a través del dragado intensivo, la sedimentación de ciénagas, la pérdida de hábitats acuáticos y la alteración de las dinámicas hidrológicas, al tiempo que introduce metales pesados en los ecosistemas. La magnitud de estas alteraciones, sumada a la limitada capacidad adaptativa del sistema social, profundiza la degradación ecológica y dificulta la recuperación del sistema socioambiental ante eventos críticos (Mount, 2020; Salazar-Camacho et al., 2020a)

Particularmente, las comunidades negras e indígenas de la cuenca presentan una vulnerabilidad estructural derivada de su fuerte dependencia de los recursos pesqueros y su íntima relación biocultural con el río. La reducción de capturas, el menor tamaño de los peces y la desaparición de especies tradicionales comprometen tanto su seguridad alimentaria como su sostenibilidad económica y cultural, constituyéndose en dimensiones esenciales a incorporar en un análisis multidimensional de la vulnerabilidad (Cano López, 2017). Adicionalmente, la existencia de altos niveles de mercurio detectados en sangre, cabello y orina de la población, demuestra la incidencia del consumo de pescado contaminado en la salud (Negrete et al., 2022), haciendo indudable la compleja trama de factores que subyace a los procesos de vulnerabilidad en este territorio.

3.9. MODELOS CONCEPTUALES APLICADOS A LA GESTIÓN AMBIENTAL

Los modelos conceptuales son representaciones cualitativas o cuantitativas de hipótesis sobre la naturaleza de los riesgos ecológicos o ambientales. Estos modelos se desarrollan para ilustrar una variedad de actividades, procesos y relaciones de estrés-respuesta, funcionando como herramientas para describir las relaciones causales entre los usos del suelo, los factores de estrés, los recursos ecológicos en riesgo y los indicadores asociados que permiten evaluar su impacto (Gentile et al., 2001; Thalheim, 2011). A continuación, se presentan los pasos genéricos para el establecimiento de un modelo conceptual que busque gestionar riesgos ambientales.

Figura 2. Pasos para el establecimiento de un modelo conceptual para la gestión de riesgos ambientales



Fuente: Adaptado de Gentile et al. (2001).

La definición de metas y objetivos claros es uno de los aspectos más importantes al establecer un modelo conceptual para abordar un riesgo ambiental. Esto permite identificar los factores de estrés, las consecuencias o efectos, y las opciones de gestión que el modelo debe considerar. Además, la delimitación del alcance espacial y temporal es fundamental para precisar el problema que se pretende resolver y determinar hasta qué nivel se podrán implementar soluciones, reconociendo que, en algunos casos, estas no serán definitivas en el corto o mediano plazo (Gentile et al., 2001; Rosenfeld et al., 2022).

Por otra parte, es crucial identificar, describir, categorizar y analizar las fuentes que generan el problema, por ejemplo, las fuentes de contaminación. Este análisis facilita la definición específica de los factores de estrés, sus características, interrelaciones, sinergias y mecanismos de acción. De esta manera, se puede comprender cómo estos factores contribuyen al problema y cómo la sociedad se ve afectada por ellos (Gentile et al., 2001).

Finalmente, toda vez que los modelos responden a situaciones específicas de una región, cuenca hidrográfica, ecosistema, entre otras delimitaciones geográficas, se hace necesario identificar y caracterizar a los receptores, incluyendo las dinámicas que se dan entre ellos y las relaciones causales, así como las variables y determinantes ambientales que deben ser monitoreados en el tiempo, para finalmente representar gráficamente el modelo conceptual (Gentile et al., 2001). Según Thalheim (2011), los modelos conceptuales pretenden crear una representación abstracta de la situación investigada o, más exactamente, de la forma en que los usuarios piensan sobre ella, por tal motivo, no es posible desarrollar un modelo conceptual si acudir a la representación gráfica que establezca las variables consideradas y las relaciones que existen entre ellas.

En este sentido, los modelos conceptuales son necesarios en todos los tipos de modelación y constituyen el aspecto más importante de ese proceso, toda vez que de su adecuada estructuración dependerá el grado de ajuste a la realidad de sus resultados, sin importar el tipo de herramienta computacional que se utilice para su ejecución (Robinson, 2013).

4. ESTRUCTURA DE LA INVESTIGACIÓN

A continuación, se describe la estructura de esta tesis doctoral, la cual consta de cuatro capítulos asociados a cada uno de los objetivos específicos propuestos.

El primer objetivo específico de esta investigación consiste en describir las interrelaciones etimológicas entre los conceptos de amenaza, vulnerabilidad y riesgo en el contexto de la contaminación por metales pesados. Para su desarrollo, se llevó a cabo una revisión bibliográfica de tipo narrativa, mediante la cual se examinó la evolución cronológica de estos conceptos a partir de aportes realizados por autores de distintas disciplinas.

Este capítulo presenta los resultados de dicho análisis conceptual, orientado a esclarecer las diferencias fundamentales entre los términos de amenaza, vulnerabilidad y riesgo. Se parte de la premisa de que la falta de precisión en la definición y comprensión de estos conceptos puede derivar en deficiencias en la formulación y aplicación de herramientas e instrumentos para la gestión de los problemas socioambientales. Cuando estos conceptos no se diferencian de manera adecuada, las intervenciones dirigidas al control, mitigación o remediación de los impactos pueden resultar ineficaces, mal orientadas o insuficientes, lo que conlleva un uso inadecuado de los recursos disponibles y una disminución de la efectividad de los procesos de gestión territorial.

Por ello, este capítulo desarrolla un análisis etimológico y conceptual detallado de los tres términos, identificando sus diferencias, las relaciones existentes entre ellos y los conceptos derivados que estructuran el marco analítico empleado en esta investigación.

El segundo objetivo específico de esta investigación consiste en identificar y caracterizar los indicadores, herramientas, instrumentos y modelos empleados en el análisis de la amenaza, vulnerabilidad y riesgo asociados a la contaminación del agua por metales pesados. Para alcanzar este objetivo, se desarrolló una Revisión Bibliográfica Sistemática (RBS), a partir de la cual se construyeron listados de herramientas, modelos e indicadores utilizados en el

abordaje de estos componentes, los cuales fueron descritos y analizados, destacando sus principales fortalezas y limitaciones.

La revisión de los artículos científicos permitió, adicionalmente, identificar los diversos aspectos socioambientales que se abordan en los estudios relacionados con la problemática central de esta investigación, aun cuando no todos ellos estén integrados de manera sistemática en las herramientas analizadas. En consecuencia, dichos aspectos fueron identificados, categorizados y valorados según su relevancia dentro del marco de esta investigación.

Este capítulo discute, además, el nivel de integralidad de los estudios revisados, evidenciando que, en numerosos casos, se recurre a herramientas específicas para concluir sobre fenómenos de naturaleza multidimensional, lo que puede limitar la comprensión holística del riesgo. Finalmente, se plantea la necesidad de desarrollar herramientas metodológicas de enfoque integral que permitan valorar de forma más precisa las condiciones reales de amenaza, vulnerabilidad y riesgo en el contexto de cuencas hidrográficas expuestas a la contaminación por metales pesados.

El tercer objetivo específico de esta investigación se centra en la cuenca del río Quito, subcuenca del río Atrato, el cual fue reconocido como sujeto de derechos mediante la Sentencia T-622 de 2016 de la Corte Constitucional de Colombia. Este objetivo consiste en analizar los factores que inciden en la amenaza y la vulnerabilidad socioambiental asociadas a la contaminación por metales pesados en dicha cuenca.

Para su desarrollo, se empleó una metodología de enfoque mixto. En una primera fase, se realizó un ejercicio participativo orientado a identificar y clasificar los factores relacionados con la amenaza y la vulnerabilidad, integrando el conocimiento técnico y el saber local. Posteriormente, se llevó a cabo una caracterización detallada de cada factor, combinando el análisis de información secundaria disponible con la recolección de información primaria en campo. En este proceso, se efectuó la toma de muestras de agua y sedimentos con el fin de caracterizar la amenaza derivada de la contaminación por metales pesados.

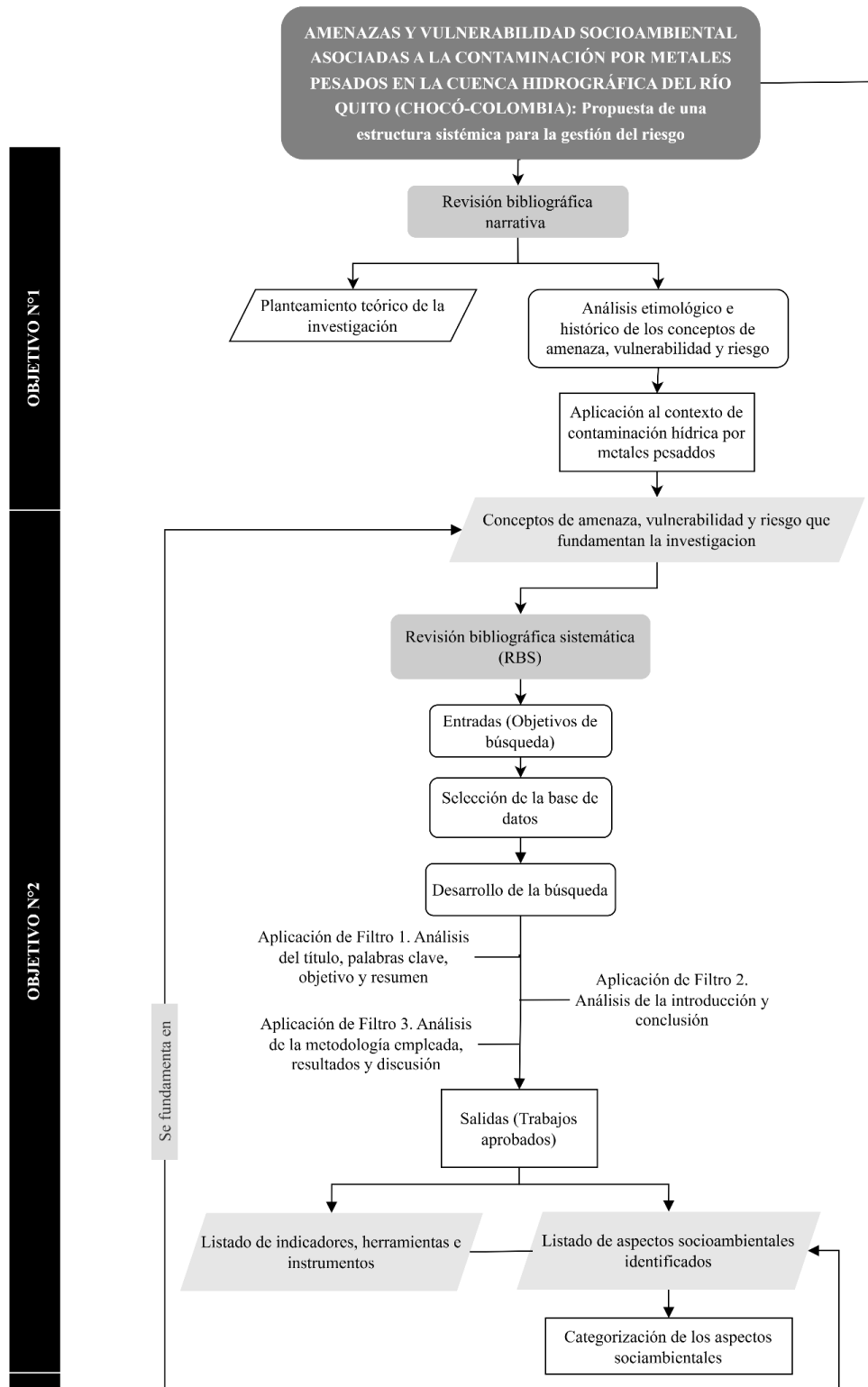
Finalmente, el análisis permitió identificar los factores determinantes y su dinámica dentro del sistema socioambiental de la cuenca, evaluando sus implicaciones tanto en la configuración de la amenaza como en los niveles de vulnerabilidad que enfrenta este territorio ante la contaminación por metales pesados.

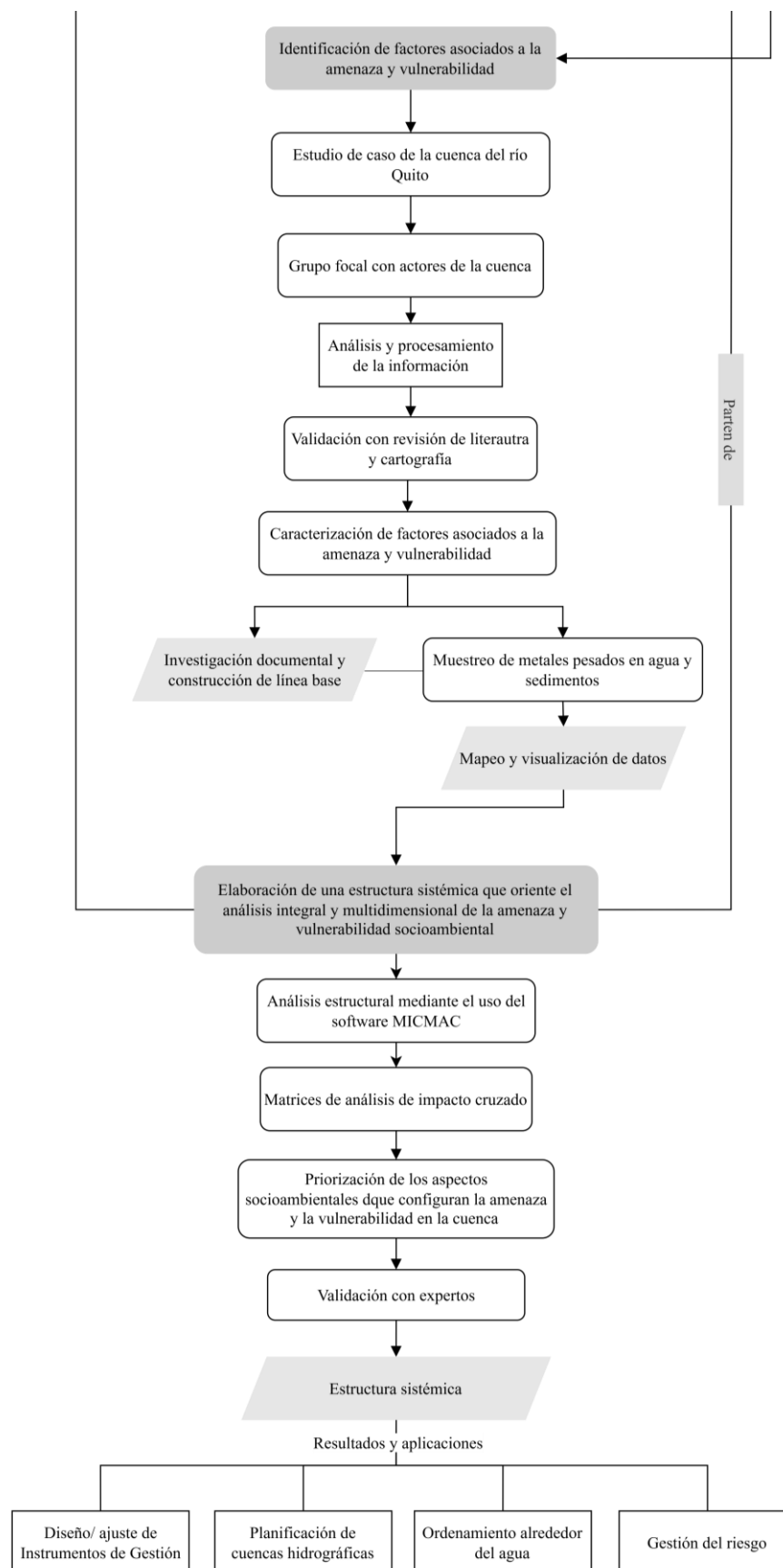
El cuarto objetivo específico se desarrolla a partir del estudio de caso de la cuenca del río Quito y se fundamenta en el conocimiento consolidado en los objetivos anteriores. Su propósito es elaborar una estructura sistémica que sirva como base para un modelo conceptual orientado al análisis de la amenaza y la vulnerabilidad en dicha cuenca, considerando el carácter multidimensional de estos conceptos y su articulación con la gestión del riesgo socioambiental.

La construcción de esta estructura parte del listado de aspectos socioambientales identificados y categorizados en la Revisión Bibliográfica Sistemática (RBS). Estos aspectos fueron sometidos a un análisis estructural de impactos cruzados mediante el uso del software MICMAC, lo que permitió identificar las variables más influyentes y dependientes dentro del sistema de relaciones que configuran la amenaza y la vulnerabilidad en la cuenca. A partir de lo anterior se generó una estructura sistémica que integra los aspectos más relevantes y estratégicos para la comprensión del riesgo asociado a la contaminación por metales pesados. Las matrices construidas para el análisis prospectivo fueron validadas mediante consulta a expertos, fortaleciendo así la robustez y la aplicabilidad del modelo propuesto.

Los resultados de este capítulo constituyen información relevante para orientar el diseño, ajuste y fortalecimiento de distintos instrumentos de gestión y planificación de cuencas hidrográficas, ordenamiento alrededor del agua y gestión del riesgo, especialmente en contextos afectados por metales pesados. La estructura sistémica generada permite focalizar de manera más precisa las acciones de control de la amenaza y reducción de la vulnerabilidad, atendiendo a las particularidades y dinámicas de los sistemas socioambientales evaluados. La Figura 3 resume la estructura de contenido de esta tesis doctoral.

Figura 3. Estructura de la investigación





Fuente: Elaboración propia (2025)

5. CAPÍTULO 1. INTERRELACIONES ETIMOLÓGICAS ENTRE LOS CONCEPTOS DE AMENAZA, VULNERABILIDAD Y RIESGO EN EL CONTEXTO DE LA CONTAMINACIÓN HÍDRICA POR METALES PESADOS.

En este capítulo de la tesis se investigaron los conceptos de amenaza, vulnerabilidad y riesgo como un paso inicial para contextualizar al lector sobre los enfoques y definiciones que orientaron esta investigación. Esto se fundamentó en la identificación de diversas corrientes de pensamiento en la literatura, las cuales abordan la gestión de riesgos y sus componentes desde perspectivas variadas, estrechamente vinculadas a las ciencias. Las diferencias en estos enfoques pueden generar interpretaciones incorrectas de los análisis presentados si no se aclara previamente el marco conceptual adoptado. Por este motivo, se llevó a cabo una revisión narrativa de la literatura, con el propósito de analizar las definiciones propuestas por diferentes autores para estos términos, describir sus interrelaciones etimológicas y establecer una base conceptual sólida. Este análisis se enfocó específicamente en el contexto de la contaminación hídrica por metales pesados, en coherencia con el objetivo general de la investigación.

La revisión de literatura científica es una técnica de investigación secundaria que resulta esencial para profundizar en temáticas caracterizadas por la existencia de información abundante, opiniones divergentes y/o falta de consenso sobre aspectos y definiciones asociadas al tema en cuestión (Snyder, 2019). Este es el caso de los conceptos de amenaza, vulnerabilidad y riesgo, ampliamente debatidos en diversos escenarios científicos y políticos debido a su incorporación en la normatividad relacionada con la gestión del riesgo de desastres y el cambio climático, tanto en Colombia como en otros países (Ferrari, 2015; Mariano; Santos, 2017). El objetivo de este capítulo fue describir las interrelaciones etimológicas entre los conceptos de amenaza, vulnerabilidad y riesgo en el contexto de la contaminación hídrica por metales pesados.

5.1. PROCEDIMIENTOS METODOLÓGICOS

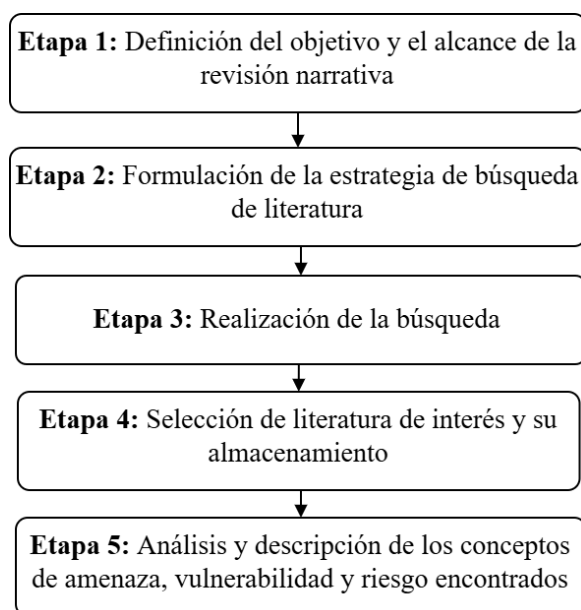
La revisión bibliográfica narrativa tuvo como objetivo compilar información científica y técnica disponible en la literatura para analizar el estado del arte de los conceptos de amenaza, vulnerabilidad y riesgo, desde una perspectiva teórica y contextual, específicamente relacionados con la contaminación ambiental. Según Ferrari (2015), este tipo de revisión no se basa en una estrategia exhaustiva de búsqueda para recopilar un amplio número de referencias bibliográficas, sino que se enfoca en el análisis crítico e interpretación personal del autor sobre la literatura publicada. Esto permitió establecer posiciones propias, debidamente

fundamentadas, que aportaron claridad a los conceptos de amenaza, vulnerabilidad y riesgo considerados en esta investigación (Ferrari, 2015).

La revisión narrativa permitió adquirir y actualizar conocimiento sobre el tema de interés en un corto plazo (Mota De Sousa et al., 2018). No obstante, al carecer de una metodología estructurada para la cuantificación de datos recopilados, su enfoque fue cualitativo, siendo útil para reconstruir principios y conceptos científicos a partir de un análisis histórico.

Teniendo en cuenta lo anterior, se realizó una revisión bibliográfica narrativa para la definición de los conceptos de amenaza, vulnerabilidad y riesgo asociados a la contaminación hídrica por metales pesados, considerando el siguiente esquema metodológico:

Figura 4. Esquema metodológico de la revisión narrativa



Fuente: Adaptado de Ferrari (2015).

A continuación, se detallan las etapas de la búsqueda narrativa:

Etap 1. Definición del objetivo de la revisión narrativa.

Se estableció el siguiente objetivo: *analizar los conceptos de amenaza, vulnerabilidad y riesgo, las interrelaciones entre estos términos y su evolución histórica, con el propósito de definir la línea etimológica que fundamenta esta investigación.*

Etap 2. Formulación de la estrategia de búsqueda de literatura.

La estrategia de búsqueda contempló la definición del periodo de tiempo, idioma, bases de datos o buscadores utilizados, tipo de documentos seleccionados y palabras clave, en la siguiente tabla se presentan los criterios establecidos:

Tabla 3. Criterios de la estrategia de búsqueda

Ítem de la estrategia de búsqueda de literatura	Criterio definido	Justificación del criterio
Periodo de tiempo de la revisión	55 años, periodo entre 1970 – 2025.	La revisión narrativa tiene entre sus propósitos el análisis de la evolución de los conceptos a través del tiempo, por tanto, se definió un plazo amplio en el periodo de búsqueda.
Idioma	Español, inglés y portugués.	Idiomas principales en los cuales se identificaron publicaciones en la temática de interés.
Base de datos o buscador	Scopus y Google Académico	El uso de Google académico como buscador es importante en la revisión narrativa para obtener resultados diversos de revistas y editoriales a nivel nacional e internacional. Por su parte, Scopus se consolida como una de las bases de datos de literatura científica más completa del mundo (Andalia; Labrada; Montejo, 2010).
Tipo de documentos seleccionados	Artículos científicos, artículos presentados en eventos académicos, libros, capítulos de libros, documentos de política pública o lineamientos técnicos.	Estos tipos de documentos representan un estándar científico aceptable, al tiempo que permiten diversidad en cuanto al tipo

		y propósito de la redacción del documento.
	Se realizó la búsqueda en dos campos, con las siguientes palabras:	
Palabras clave	Campo 1: Concepto, definición, principios, fundamentos. Campo 2: Amenaza ambiental, vulnerabilidad ambiental, riesgo ambiental, amenaza socioambiental, vulnerabilidad socioambiental, riesgo socioambiental.	Se definieron estas palabras clave para orientar la revisión narrativa hacia el análisis etimológica de los términos de interés.
Fuente: Elaboración propia (2025)		

Nota: los documentos que no cumplieron con los criterios definidos no fueron incluidos en la revisión narrativa de la literatura, por tanto, lo anterior se consideran también criterios de exclusión.

Etapas 3. Realización de la búsqueda de literatura.

La búsqueda de literatura se realizó en la base de datos Scopus y en el buscador Google Académico, utilizando el operador booleano “AND” para combinar las palabras clave de los campos 1 y 2. En el caso de Scopus, se analizaron los primeros 30 resultados obtenidos, realizando una lectura inicial de los títulos para verificar su asociación con el tema de interés. Por su parte, en Google Académico se revisaron los primeros 10 resultados, aplicando el mismo criterio de lectura de títulos para comprobar su relación con el tema. Los criterios de búsqueda definidos en la estrategia se aplicaron a los filtros de cada base de datos (Scopus y Google Académico) delimitando así los resultados obtenidos.

Etapas 4. Selección de literatura de interés y su almacenamiento en Zotero.

Los resúmenes de los resultados obtenidos mediante la combinación de palabras clave en Scopus y Google Académico fueron analizados. Para su selección, se aplicó el filtro establecido en la Tabla 4, seleccionando únicamente la información que cumpliera con al menos dos de las tres preguntas indicadas en dicho filtro. Las referencias bibliográficas seleccionadas fueron descargadas y almacenadas en la biblioteca del gestor bibliográfico Zotero, el cual

permitió su recolección, consolidación, administración y posterior citación de manera organizada. Además, Zotero permite el almacenamiento de esta información en directorios de fácil manejo y transferibles a otros interesados (Morales Caluña; Altamirano Capelo, 2019).

Tabla 4. Filtro para la selección de literatura

Título y palabras clave	Objetivo	Texto del resumen
¿El título y palabras clave permiten inferir que el documento trata sobre amenaza, vulnerabilidad y/o riesgo en el contexto de contaminación ambiental?	¿El objetivo de la investigación contempla aspectos asociados a la amenaza, vulnerabilidad y/o riesgo en el contexto de contaminación ambiental?	La información introductoria, los métodos y las conclusiones resumidas que se presentan en el texto indican que la información contenida trata de aspectos asociados a la amenaza, vulnerabilidad y/o riesgo en el contexto de contaminación ambiental?

Fuente: Elaboración propia (2025)

Por último, los documentos que cumplieron con el filtro de la Tabla 3 fueron leídos y analizados en su totalidad extrayendo de ellos los conceptos, definiciones, descripciones o apreciaciones de cada autor sobre los términos de amenaza, vulnerabilidad y riesgo en el contexto de contaminación ambiental.

Etapa 5. Análisis y descripción de los conceptos de amenaza, vulnerabilidad y riesgo encontrados.

En esta etapa, se realizó el análisis detallado de los conceptos de amenaza, vulnerabilidad y riesgo identificados en la literatura seleccionada. Las definiciones de los términos fueron organizadas cronológicamente en tablas, agrupando los conceptos desde los más antiguos hasta los más recientes. Para cada uno de los conceptos, se indicó el autor correspondiente, permitiendo una visión clara de la evolución y las variaciones en su definición a lo largo del tiempo. La organización cronológica de los conceptos facilitó el análisis de su evolución y contextualización en diferentes periodos. Además, se empleó un flujograma para representar las interrelaciones entre los términos y sus subclasificaciones, lo que permitió establecer de manera estructurada cómo estos conceptos se interconectan en el marco de la gestión de riesgos ambientales.

5.2. RESULTADOS

La importancia de reconocer la diferenciación entre estos términos radica en la factibilidad y eficacia de su implementación en la gestión del riesgo; Según Cardona (2001), el riesgo solía entenderse como la posibilidad de ocurrencia de un hecho adverso asociado exclusivamente a una causa externa, el fenómeno, frente al cual se asumía una capacidad limitada de intervención. No obstante, el desarrollo conceptual del término vulnerabilidad permitió identificar que la gran mayoría de las veces existían condiciones extremas que hacían realmente frágil el desempeño de ciertos grupos sociales y estaban directamente relacionadas al nivel de desarrollo alcanzado y a la capacidad de planificar ese desarrollo (Cardona, 2001).

Por su parte, la definición del término amenaza ha sido unánime desde las primeras publicaciones, entendiéndolo como un factor de riesgo externo que depende de la intensidad y exposición y se presenta sobre un área geográfica específica. Según Cardona (2001), el riesgo es el resultado de la convolución de la amenaza y vulnerabilidad, indicando una relación de concomitancia y mutuo condicionamiento, es decir no se puede ser vulnerable si no se está amenazado y no existe condición de amenaza para un elemento, sujeto o sistema, si no está expuesto y es vulnerable a la acción potencial que representa esa amenaza (Cardona, 2001).

En este sentido, el consenso entre las diferentes líneas de pensamiento implicadas en el uso de esta terminología es importante para la implementación de herramientas e instrumentos de gestión del riesgo y abre las posibilidades a la priorización de acciones concretas para reducir la vulnerabilidad o neutralizar la amenaza, cualquiera que sea el camino elegido, conllevará a una disminución o mitigación del riesgo (Liverman, 2001).

En la revisión narrativa de la literatura se identificaron los conceptos presentados en las tablas 5, 6 y 7 para los términos de amenaza, vulnerabilidad y riesgo respectivamente, indicando autor y año de publicación de forma ascendente. La selección de estos artículos, documentos, entre otros fue realizada a partir de la aplicación de los criterios establecidos en la Tabla 4.

Tabla 5. Conceptos de amenaza obtenidos en la revisión narrativa de literatura

Autor	Año	Concepto
Reuss	1982	Un peligro es un acontecimiento natural percibido como una amenaza para la vida y la propiedad (Reuss, 1982).
IPENZ	1984	La amenaza es la condición o situación que puede causar daños a las personas, los bienes o el medio ambiente

		(Institution of Professional Engineers New Zealand., 1984).
Downing et al.	1991	Probabilidad de que se produzca un fenómeno potencialmente nocivo en un periodo de tiempo y una zona determinados (Downing, 1991).
Gardenier y Keey	1992	Una pérdida potencial que puede causar daños humanos, sociales, medioambientales o económicos (Gardenier; Keey, 1992).
Cardona	2001	El concepto de amenaza se refiere a un peligro latente o factor de riesgo externo de un sistema o de un sujeto expuesto, que se puede expresar en forma matemática como la probabilidad de exceder un nivel de ocurrencia de un suceso con una cierta intensidad, en un sitio específico y durante un tiempo de exposición determinado (Cardona, 2001).
Smith	2003	La amenaza es tratada como un sinónimo de peligro. El peligro forma parte ineludible de la vida y es uno de los componentes del riesgo. Para el autor, el peligro es una amenaza potencial para las personas y sus bienes, mientras que el riesgo es la probabilidad de que un peligro ocurra y genere pérdidas (Smith, 2003).
Congreso de Colombia	2012	Peligro latente de que un evento físico de origen natural, o causado, o inducido por la acción humana de manera accidental, se presente con una severidad suficiente para causar pérdida de vidas, lesiones u otros impactos en la salud, así como también daños y pérdidas en los bienes, la infraestructura, los medios de sustento, la prestación de servicios y los recursos ambientales(Colombia, 2012).
Spanidis, Roumpos y Pavloudakis	2021	Un peligro es un suceso físico, un fenómeno o una actividad humana potencialmente dañinos que pueden causar la pérdida de vidas o lesiones, daños materiales, trastornos sociales y económicos o la degradación del medio ambiente (Spanidis; Roumpos; Pavloudakis, 2021)
UNDRR	2025	Los peligros pueden ser de origen natural, antropogénico o socionatural. Los peligros naturales están asociados predominantemente a procesos y fenómenos naturales.

		Los peligros antropogénicos, o inducidos por el hombre, son inducidos total o predominantemente por actividades y decisiones humanas. Este término no incluye la aparición o el riesgo de conflictos armados y otras situaciones de inestabilidad o tensión social sujetas al derecho humanitario internacional y a la legislación nacional. Varios peligros son socionaturales, en el sentido de que están asociados a una combinación de factores naturales y antropogénicos, como la degradación del medio ambiente y el cambio climático (United Nations Office for Disaster Risk Reduction (UNDRR), 2025).
UNDRR	2025	Los peligros medioambientales pueden incluir peligros químicos, naturales y biológicos. Pueden deberse a la degradación del medio ambiente o a la contaminación física o química del aire, el agua y el suelo. Sin embargo, muchos de los procesos y fenómenos que entran en esta categoría pueden denominarse impulsores de peligros y riesgos más que peligros en sí mismos, como la degradación del suelo, la deforestación, la pérdida de biodiversidad, la salinización y la subida del nivel del mar (United Nations Office for Disaster Risk Reduction (UNDRR), 2025).

Fuente: Elaboración propia (2025)

Según la tabla anterior, el concepto de amenaza se ha mantenido constante desde sus primeras definiciones, aunque con el tiempo se le han añadido nuevos elementos y clasificaciones que lo hacen más específico y claro. Estas incorporaciones han facilitado la caracterización y evaluación de la amenaza dentro de los estudios de gestión del riesgo. Entre el año 1982 y 1991 se evidenció la ampliación del concepto de amenaza en donde los daños potenciales no hacen referencia únicamente a la vida y los bienes, sino también al medio ambiente. Posteriormente entre 1992 y 2001, se incluyen también las dimensiones sociales y económicas y se cuantifica matemáticamente la amenaza, expresada como la probabilidad de que un evento supere cierto umbral de intensidad en un tiempo y espacio determinados. A partir del año 2012, y coincidiendo con la expedición de la ley 1523 de 2012 por la cual se adoptó la política nacional de gestión del riesgo de desastres en Colombia, se reconocen en el concepto de amenaza, aquellas inducidas por actividades humanas, ampliando el enfoque inicial más

asociado a las amenazas de origen natural y sobre todo climático. Finalmente, en los últimos años se presentaron subclasificaciones para el concepto de amenaza, existiendo las amenazas naturales, antropogénicas y socio naturales; y se reconoce que la degradación ambiental es un impulsor de amenazas.

Tabla 6. Conceptos de vulnerabilidad obtenidos en la revisión narrativa de literatura

Autor	Año	Concepto
United Nations Disaster Relief Coordinator (UNDRO)	1980	La vulnerabilidad es el grado de pérdida de un determinado elemento en riesgo o conjunto de tales elementos resultante de la ocurrencia de un fenómeno natural de cierta magnitud y expresado en una escala de 0 (ningún daño) a 1 (pérdida total) (Office of the United Nation Disaster Relief Coordinator, 1980)
Kates et al.	1985	La vulnerabilidad es la capacidad de sufrir daños y reaccionar negativamente (Kates; Ausubel; Berberian, 1985)
Mitchel et al.	1989	Potencial de pérdida de un sistema (Mitchell; Devine; Jagger, 1989)
Wisner et al.	1994	La vulnerabilidad es la condición de ser propenso o susceptible a sufrir daños o lesiones, abarca las características de una persona o grupo y su situación que influyen en su capacidad para anticipar, hacer frente, resistir y recuperarse del impacto de un peligro natural. Es decir, se trata de una combinación de factores que determinan el grado en que la vida y los medios de subsistencia de una persona corren peligro a causa de un acontecimiento concreto que puede identificarse en la naturaleza o en la sociedad (Wisner et al., 1994).
Cutter	1996	Vulnerabilidad es “la posibilidad de sufrir pérdidas”, Este concepto reconoce la imprecisión y divergencia de las definiciones e identifica tres tipologías: vulnerabilidad individual, social y biofísica. Además, ofrece una categorización de la vulnerabilidad así: a) la vulnerabilidad como condición preexistente, centrada en la exposición al riesgo/peligro (muy en consonancia con la bibliografía dominante sobre catástrofes); b) la

		vulnerabilidad como respuesta social a los peligros, y c) la vulnerabilidad como peligro del lugar, centrada en la dimensión espacial que caracteriza las interacciones entre los riesgos biofísicos y las respuestas sociales (Cutter, 1996a).
Kelly y Adger	2000	La capacidad de prever, afrontar, resistir y recuperarse del impacto de un peligro natural (Kelly; Adger, 2000)
Liverman Diana	2001	Distingue entre la vulnerabilidad como condición biofísica y la vulnerabilidad definida por las condiciones políticas, sociales y económicas de la sociedad. Diferencia la vulnerabilidad en el espacio geográfico (dónde se encuentran las personas y los lugares vulnerables) y la vulnerabilidad en el espacio social (quién es vulnerable en ese lugar). Indica que la vulnerabilidad ha sido asociada o equiparada con conceptos como: resiliencia, marginación, susceptibilidad, adaptabilidad, fragilidad y riesgo (Liverman, 2001).
IPCC	2001	La vulnerabilidad es el grado en que un sistema es susceptible e incapaz de hacer frente a los efectos adversos del cambio climático, incluida la variabilidad y los extremos climáticos. La vulnerabilidad está en función del carácter, la magnitud, tasa de cambio y la variación climática a los que está expuesto un sistema, depende de su sensibilidad y de su capacidad de adaptación (IPCC, 2001).
Cardona	2001	Reducida capacidad de adaptarse o ajustarse a determinada circunstancia. La vulnerabilidad se entiende como un factor de riesgo interno expresado matemáticamente con la factibilidad de que el sujeto o sistema expuesto sea afectado por el fenómeno que caracteriza la amenaza (Cardona, 2001).
Turner et al.	2003	La vulnerabilidad es el grado de probabilidad de que un sistema, subsistema o componente de un sistema sufra daños debido a la exposición a un peligro, ya sea una perturbación o una tensión. A su vez, una perturbación se define como un gran pico de presión fuera del rango

		habitual, mientras que una tensión es una presión continua o que aumenta lentamente (Turner et al., 2003).
Bogardi y Birkmann	2004	Un conjunto de condiciones y procesos resultantes de factores físicos, sociales, económicos y ambientales, que aumentan la susceptibilidad de una comunidad al impacto de las amenazas (BOGARDI; BIRKMANN, 2004).
Leone y Vinet	2006	Proponen diversos tipos de vulnerabilidad, así: Vulnerabilidad física: Se centran en analizar las redes de infraestructuras y el potencial de pérdidas humanas. Vulnerabilidad social o humana: Evalúa la información que aporta la experiencia sobre las capacidades de respuesta, las adaptaciones, los comportamientos y sus consecuencias socioeconómicas y territoriales. Vulnerabilidad institucional: se trata de la capacidad de las instituciones para responder a la crisis; funciona como un factor indirecto de vulnerabilidad social. Vulnerabilidad ambiental o patrimonial: Analiza los daños causados por los fenómenos naturales a los componentes del medio ambiente: vegetación, suelo, recursos hídricos, fauna y aspectos culturales. Vulnerabilidad funcional y económica: evalúa las disfunciones de las actividades económicas, las perturbaciones de las redes de comunicación y transporte, entre otras(Leone; Vinet, 2006).
Polsky et al.	2007	La vulnerabilidad implica una investigación exhaustiva de las dimensiones biofísicas, cognitivas y sociales de las interacciones entre el ser humano y el medio ambiente (Polsky; Neff; Yarnal, 2007).
Congreso de la República de Colombia	Ley 1523 de 2012	Susceptibilidad o fragilidad física, económica, social, ambiental o institucional que tiene una comunidad de ser afectada o de sufrir efectos adversos en caso de que un evento físico peligroso se presente. Corresponde a la predisposición a sufrir pérdidas o daños de los seres humanos y sus medios de subsistencia, así como de sus sistemas físicos, sociales, económicos y de apoyo que

		pueden ser afectados por eventos físicos peligrosos (Colombia, 2012).
Ellison	2015	La vulnerabilidad es un concepto inclusivo para analizar la respuesta socioecológica acoplada al cambio medioambiental, definida como la propensión o predisposición a verse afectada negativamente. La vulnerabilidad se conceptualizó en tres dimensiones: exposición al estrés, sensibilidad asociada y capacidad de adaptación relacionada(Ellison, 2015).
Aquino et al.	2017	La vulnerabilidad ambiental puede definirse como el grado en que un sistema natural es susceptible o incapaz de hacer frente a los efectos de interacciones externas. Puede deberse a características ambientales naturales o a la presión causada por la actividad antropogénica; o incluso a sistemas frágiles con baja resiliencia, es decir, la capacidad concreta del medio ambiente para volver a su estado natural de excelencia, superando una situación crítica (Aquino et al., 2017).
CAR de Cundinamarca	2021	La vulnerabilidad se calcula a partir de la diferencia entre sensibilidad y capacidad adaptativa teniendo en cuenta los criterios establecidos para cada uno de los aspectos del territorio. La sensibilidad hace referencia al grado en el que el impacto podría afectar el aspecto del territorio y sus sistemas socioeconómicos y la capacidad adaptativa hace referencia a las características socioeconómicas, institucionales, etc., que permitirán afrontar nuevas condiciones y adaptarse a ellas (Corporación Autónoma Regional de Cundinamarca CAR, 2021).
Zhang et al.	2019	La Vulnerabilidad es un componente dinámico, evolutivo y cambiante, debe situarse en las interconexiones de las variables biofísicas y socioeconómicas (Zhang; Zhao; Tang, 2019).
Barker et al.	2022	La vulnerabilidad es una consecuencia de la exposición, la sensibilidad y la capacidad de adaptación de un sistema; la exposición y la sensibilidad están más relacionadas con

la vulnerabilidad que con la capacidad de adaptación
(Sarker et al., 2022).

Fuente: Elaboración propia (2025)

El análisis etimológico del concepto de vulnerabilidad demuestra mayor dificultad para llegar a un consenso debido a la diversidad de corrientes de pensamiento que lo han abordado e incorporado en su vocabulario. Las confusiones y contradicciones a la hora de establecer una definición consensuada de vulnerabilidad implican grandes dificultades a la hora de hacer operativo el concepto (Almeida, 2012). Por ejemplo, para el periodo comprendido entre 1980 y 1989 la vulnerabilidad se asociaba más con factores físicos y cuantificables. No obstante, a partir de la década de los 90 se amplió la definición integrando factores humanos, sociales y económicos que influyen en la susceptibilidad al daño y la capacidad de respuesta. Paralelamente, los investigadores del cambio climático incorporaron el término a su vocabulario, definiendo la capacidad de adaptación como un elemento clave del concepto (Gumel, 2022).

En la primera década de los 2000, la vulnerabilidad se definió como el resultado de condiciones y procesos físicos, sociales, económicos y ambientales. Desde esta perspectiva, no sería necesario establecer subclasificaciones, ya que el concepto abarcaría todos estos factores de manera integral. Sin embargo, diversos autores propusieron subtipos de vulnerabilidad, como la física, social, institucional, ambiental y económica. Esta divergencia refleja la falta de consenso que persistía en torno a su definición.

A partir del año 2008 surgieron otros términos paralelos utilizados en los discursos sobre vulnerabilidad, lo cual complejizó aún más el marco conceptual de esta ciencia. La *resiliencia* aparece entonces como un elemento clave en la gestión de riesgos, siendo definida como la capacidad de un sistema ecológico o social para absorber riesgos manteniendo su estructura básica y sus pautas de funcionamiento, lo cual la hace estrechamente ligada a la subclasificación de vulnerabilidad ambiental (Parry, 2007). Así mismo, conceptos como exposición, sensibilidad y capacidad de adaptación, se definen como elementos de la vulnerabilidad y se plantea matemáticamente su relación en función de la probabilidad (Ellison, 2015). La vulnerabilidad se diferenció de la amenaza en que esta aparece como un factor de riesgo interno del sistema.

En Colombia, la expedición de la Ley 1523 de 2012 incorporó el término vulnerabilidad en la normatividad sobre gestión del riesgo de desastres, con el propósito de operativizar el concepto y conducir la implementación de acciones de reducción, mitigación y/o control de riesgos. A partir de entonces, las autoridades e instituciones ambientales comenzaron a

desarrollar mecanismos para evaluar la vulnerabilidad de las cuencas hidrográficas ante diversas amenazas, estableciendo modelos matemáticos que relacionan sus distintos elementos. Estas evaluaciones poseen un alto rigor técnico y son la base sobre la cual se construyen planes de acción.

Tabla 7. Conceptos de riesgo obtenidos en la revisión narrativa de literatura

Autor	Año	Concepto
Downing	1991	Pérdidas previstas (de vidas, personas heridas, bienes dañados, interrupción de la actividad económica) debidas a un peligro específico para una zona y un periodo de referencia determinados (Downing, 1991).
Crichton	1999	El riesgo es la probabilidad de sufrir una pérdida, y depende de tres elementos: peligro, vulnerabilidad y exposición (Crichton, 1999).
Cardona	2001	El riesgo corresponde al potencial de pérdida que pueden ocurrirle al sujeto o al sistema expuesto, resultado de la convolución de la amenaza y vulnerabilidad. Así el riesgo puede expresarse en forma matemática como la probabilidad de exceder un nivel de consecuencias económicas, sociales o ambientales en un cierto sitio y durante un cierto periodo de tiempo (Cardona, 2001)
Smith	2003	Probabilidad de ocurrencia de un peligro específico (Smith, 2003).
Almeida	2012	Los riesgos naturales son riesgos sentidos, percibidos y soportados por un grupo social o un individuo sometido a la posible acción de un proceso físico natural; pueden ser de origen litosférico (terremotos, corrimientos de tierras, erupciones volcánicas), e hidro climático (cyclones, tormentas, lluvias torrenciales, inundaciones, ventiscas, granizadas, sequías); tienen causas físicas que escapan en gran medida a la intervención humana y son difíciles de predecir. Por su parte, los riesgos ambientales son el resultado de un peligro natural cuyo impacto se ve magnificado por las actividades humanas y la ocupación del suelo (Almeida, 2012)

Congreso de Colombia	2012	Riesgo de desastres: Corresponde a los daños o pérdidas potenciales que pueden presentarse debido a los eventos físicos peligrosos de origen natural, socio-natural tecnológico, biosanitario o humano no intencional, en un período de tiempo específico y que son determinados por la vulnerabilidad de los elementos expuestos; por consiguiente el riesgo de desastres se deriva de la combinación de la amenaza y la vulnerabilidad (Colombia, 2012)
Gaillard, Kelman y Wisner	2012	El riesgo es la percepción que tiene un individuo o un grupo de individuos de la probabilidad de que se produzca un acontecimiento potencialmente peligroso y perjudicial, cuyas consecuencias están en función de la vulnerabilidad intrínseca de dicho individuo o grupo. Cabe señalar que, en general, la noción de riesgo se confunde con la noción del acontecimiento en sí que causa la amenaza o el peligro, lo que dificulta su percepción y gestión. Así, la noción de peligro, que es diferente de la idea de riesgo, está relacionada con la posibilidad o la ocurrencia real de un suceso que causa daño(Gaillard; Kelman; Wisner, 2012).
Spanidis, Roumpos y Pavloudakis	2021	El riesgo es la probabilidad de que se produzca un acontecimiento incierto multiplicada por el coste o beneficio resultante, si dicho acontecimiento tiene lugar.(Spanidis; Roumpos; Pavloudakis, 2021)
Graveline y Germain	2022	Se entiende el número previsto de vidas perdidas, personas heridas, daños materiales y perturbación de la actividad económica debidos a un fenómeno natural concreto y, en consecuencia, el producto de riesgo específico y los elementos de riesgo (Graveline; Germain, 2022).
UNDRR	2025	La pérdida potencial de vidas, lesiones o bienes destruidos o dañados que podría sufrir un sistema, una sociedad o una comunidad en un periodo de tiempo específico, determinada de forma probabilística en función de la amenaza, la exposición, la vulnerabilidad y la capacidad (United Nations Office for Disaster Risk Reduction (UNDRR), 2025).

Fuente: Elaboración propia (2025)

Las primeras definiciones del término riesgo, estaban asociadas a un peligro específico que se manifiesta en un lugar y momento determinado sobre un sistema o elemento. Sin embargo, para finales del siglo XX e inicios del XXI, se estableció la relación entre el riesgo y la vulnerabilidad y el riesgo y la amenaza, indicando que, la amenaza es un factor de riesgo externo y la vulnerabilidad, interno. Crichton (1999) estableció la relación de dependencia del riesgo como la amenaza o peligro, la vulnerabilidad y la exposición (Crichton, 1999). En el 2001, Omar Cardona planteó que el riesgo es resultado de la convolución de los términos amenaza y vulnerabilidad, de lo cual se puede inferir, que el autor consideró la exposición como elemento de la vulnerabilidad, al no establecerlo de manera independiente en la relación matemática planteada (Cardona, 2001).

A partir del año 2010, tal como ocurrió con los términos de amenaza y vulnerabilidad, el riesgo fue subclasificado en diferentes tipos, siendo estos: riesgos naturales, riesgos ambientales, riesgo de desastres, entre otros. Para Colombia, la expedición de la ley 1523 de 2012, particularizó la subclasificación de riesgo de desastres, dándole un énfasis de política pública para facilitar la implementación de los instrumentos de gestión que buscan su reducción, mitigación y control. En el mismo periodo, surgieron debates sobre confusiones conceptuales entre riesgo y amenaza, algunos autores plantearon la necesidad de estandarizar los conceptos dado que su confusión dificultaría la gestión del riesgo, sobre todo por la condición de factor externo que posee la amenaza. Se concluyó que hay mayor dificultad en la implementación de acciones de reducción, mitigación y control dirigidas a la amenaza, por ser una variable independiente del sistema que se busca gestionar (Hung; Hung; Hsu, 2024). Finalmente, en los últimos cinco (5) años también se ha integrado al concepto de riesgo el análisis de costo-beneficio lo que amplía la definición de lo que se consideraba una pérdida.

En la actualidad, el concepto de riesgo es visto de forma probabilística, incorporando no solo la amenaza y vulnerabilidad, sino también la capacidad de respuesta y los posibles costos o beneficios de los eventos inciertos. La definición actual de la UNDRR relaciona la dependencia del riesgo a cuatro factores, que son la amenaza, la exposición, la vulnerabilidad y la capacidad (United Nations Office for Disaster Risk Reduction (UNDRR), 2025).

5.3. DISCUSIONES

Los problemas y conflictos medioambientales suelen abordarse desde una perspectiva multidisciplinaria, donde convergen diferentes ciencias y corrientes de pensamiento. A nivel científico esta característica enriquece las discusiones y amplía la perspectiva de las

investigaciones. No obstante, a nivel técnico y de legislación aplicada, la falta de consenso entre las ciencias sobre un mismo asunto puede debilitar su implementación y materialización (Rosso Pinto; Hanai, 2023). De acuerdo con los resultados de la revisión de literatura narrativa, el termino vulnerabilidad ha presentado un mayor dinamismo en su desarrollo etimológico, comparado con los términos de amenaza y riesgo. Para esta investigación, que se enmarca en las ciencias ambientales, se seleccionaron las definiciones establecidas en la siguiente Tabla 8.

Tabla 8. Conceptos establecidos para los términos de amenaza, vulnerabilidad y riesgo

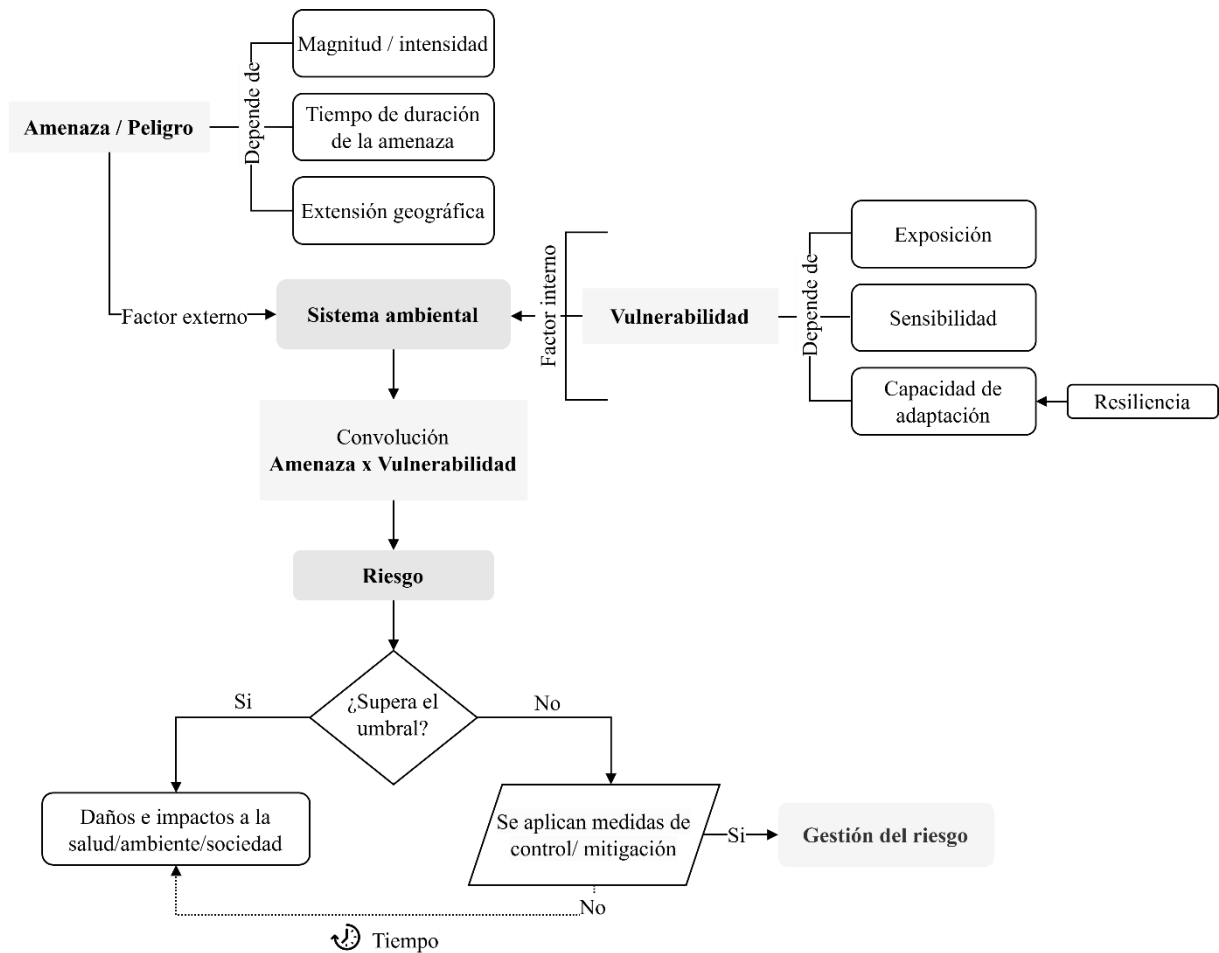
Término	Definición	Elementos que lo conforman	Elementos que lo relacionan con los otros conceptos
Amenaza	Una amenaza es un peligro latente o factor de riesgo interno (físico, natural o proveniente de actividad humanas) potencialmente dañino que pueden causar la pérdida de vidas o lesiones, daños materiales, trastornos sociales y económicos o la degradación del medio ambiente. Se puede expresar matemáticamente como la probabilidad de exceder un nivel de ocurrencia de un suceso con una cierta intensidad, en un sitio específico y durante un tiempo de exposición determinado (Cardona, 2001; Spanidis; Roumpos; Pavloudakis, 2021).	-Peligro	-Se presentan en todas dimensiones (ambiental, social, económica, física). -Son elementos que condicionan la existencia del riesgo -Están asociados al contexto de un territorio
Vulnerabilidad	La vulnerabilidad es el grado en que un sistema natural es susceptible o incapaz de hacer frente a los efectos de interacciones externas (Aquino et al., 2017). La vulnerabilidad se entiende como un factor de riesgo interno expresado matemáticamente con la factibilidad de que el sujeto o sistema expuesto sea afectado por el fenómeno	-Exposición -Sensibilidad -Capacidad de Adaptación	-Son elementos cuantificables -Son elementos dinámicos

	que caracteriza la amenaza (Cardona, 2001).		
Riesgo	El riesgo corresponde al potencial de pérdida que puede ocurrirle al sujeto o al sistema expuesto, resultado de la convolución de la amenaza y vulnerabilidad. Así el riesgo puede expresarse en forma matemática como la probabilidad de exceder un nivel de consecuencias económicas, sociales o ambientales en un cierto sitio y durante un cierto periodo de tiempo (Cardona, 2001).	-Amenaza -Vulnerabilidad	-Depende de la convolución resultante de la amenaza y la vulnerabilidad -Los tres conceptos se asocian a situaciones potenciales de pérdida o daño -Los tres conceptos son cuantificables -Los tres conceptos se utilizan para la toma de decisiones para la Gestión Integral del Recurso Hídrico

Fuente: Elaboración propia (2025)

El siguiente flujograma muestra las relaciones etimológicas entre estos conceptos, así como la manera en que esta investigación interpreta sus definiciones y conexiones, las cuales representan la base teórica del análisis y de las propuestas aquí planteadas.

Figura 5. Flujograma de relaciones etimológicas entre los conceptos de amenaza, vulnerabilidad y riesgo



Fuente: Elaboración propia (2025)

La figura anterior muestra que la amenaza es un factor de riesgo externo caracterizado por su magnitud o intensidad, el tiempo en que sucede y la extensión geográfica que alcanza, es decir, es un factor que depende del grado, el momento y el lugar, y en función de esos tres aspectos, puede categorizarse cualitativamente entre los rangos de amenaza baja a amenaza alta; en contraste, la vulnerabilidad es un factor de riesgo interno que depende de la exposición, sensibilidad y capacidad de adaptación del sistema. Ambos conceptos convergen en la generación del riesgo, entendido como la convolución de la amenaza y la vulnerabilidad (Cardona, 2001). En este sentido, se enfatiza que el riesgo no es estático, sino un resultado dinámico de la interacción entre las condiciones del entorno y la susceptibilidad del sistema potencialmente afectado.

Así mismo, se introduce la gestión del riesgo como un proceso clave en la reducción de los impactos adversos. Si se aplican medidas de control o mitigación, la vulnerabilidad puede

disminuir, reduciendo así el riesgo general, si se eliminan las fuentes de peligro, la amenaza puede desaparecer, y así también el riesgo general. Lo valioso de esta relación de convolución entre ambos factores, es que la gestión puede enfocarse en disminuir o de preferencia eliminar uno de los dos factores, aquel que para el caso específico sea viable de manejar desde lo técnico y financiero, pues con este logro, el riesgo también disminuirá o incluso se hará cero. Algunos autores han indicado que desde el punto de vista operativo se puede manejar con mayor facilidad un enfoque de disminución de la vulnerabilidad, no obstante esto depende de cada caso (Hung; Hung; Hsu, 2024).

En el flujograma también se establece que la resiliencia es un concepto que integra la capacidad de adaptación, incluyendo elementos asociados con la recuperación. La resiliencia se define como la capacidad de un sistema para absorber perturbaciones manteniendo su estructura, funciones y capacidad de adaptación. Por tanto la resiliencia y la vulnerabilidad, no tienen una relación inversamente proporcional, toda vez que representan dimensiones distintas de los sistemas socio ecológicos y pueden coexistir de forma compleja, dependiendo del contexto y la escala temporal o espacial en que se analicen. Se concluye entonces que el factor común entre ambos conceptos es la capacidad de adaptación (Ellison, 2015; Hung; Hung; Hsu, 2024). Finalmente, en cuanto a la implementación de acciones para la mitigación o control del riesgo, se presenta el tiempo como un factor determinante, ya que la evolución del riesgo depende de la respuesta ante los cambios en las amenazas y las capacidades del sistema para enfrentarlas.

5.4. CONSIDERACIONES FINALES

El análisis etimológico de los conceptos de amenaza, vulnerabilidad y riesgo permitió identificar la evolución teórica y la diversidad de enfoques aplicados a su estudio en la gestión ambiental. En particular, la amenaza se ha definido como un peligro latente o factor de riesgo externo, de origen físico, natural o antropogénico, que puede generar impactos a la vida humana, la infraestructura y el medio ambiente. Este concepto, según Cardona (2001) y Spanidis, Roumpos y Pavloudakis (2021), se expresa matemáticamente como la probabilidad de que un evento supere un umbral de ocurrencia en un tiempo y espacio específicos. La vulnerabilidad, por su parte, ha sido un término más dinámico en su construcción teórica, evolucionando desde una visión inicial enfocada en la susceptibilidad física hasta una perspectiva integral que considera factores de exposición, sensibilidad y capacidad de adaptación (Aquino et al., 2017; Cardona, 2001).

Se identificó que el riesgo es el resultado de la interacción entre amenaza y vulnerabilidad, lo que refuerza la idea de que no puede existir riesgo sin la presencia simultánea de estos dos factores. Mientras que la amenaza representa la fuente potencial de daño, la vulnerabilidad determina qué tan susceptible es un sistema ante impactos adversos. Esta relación ha sido ampliamente discutida en la literatura, permitiendo consolidar una visión en la que el riesgo no es un valor estático, sino una construcción dinámica que varía en función de las condiciones socioambientales y de las capacidades de respuesta de los sistemas afectados.

En la presente investigación, se adoptarán los conceptos de amenaza y vulnerabilidad descritos anteriormente, dado que proporcionan un marco sólido para analizar la contaminación del agua por metales pesados. Se considerará la vulnerabilidad como un factor de riesgo interno, definido por la exposición, sensibilidad y capacidad de adaptación del sistema afectado, mientras que la amenaza será entendida como un factor externo cuya magnitud, frecuencia y duración determinan el nivel de riesgo resultante. Este enfoque permitirá estructurar un análisis coherente de los impactos ambientales y de los factores que contribuyen a su intensificación en la subcuenca del río Quito.

La definición clara y consensuada de estos conceptos no solo facilita el análisis científico del riesgo, sino que también optimiza la implementación de medidas de control y mitigación, permitiendo diseñar estrategias más eficientes y ajustadas a las particularidades de cada contexto. En el caso de Colombia, donde la gestión del riesgo se estableció en la Ley 1523 de 2012, contar con una base conceptual precisa y ampliamente aceptada favorece el desarrollo de instrumentos técnicos más eficaces para la reducción del riesgo de desastres y la protección de los sistemas socioambientales vulnerables. Esto es fundamental para garantizar el cumplimiento de la política pública en la materia, asegurando que las acciones implementadas sean coherentes con los principios de prevención, reducción y adaptación frente a las amenazas y vulnerabilidades identificadas en el territorio, especialmente en la cuenca del río Atrato, la cual ha sido severamente afectada por la minería aluvial y otras actividades antrópicas que han generado la contaminación por metales pesados, generando impactos significativos en los ecosistemas acuáticos y en las comunidades ribereñas expuestas a estos riesgos ambientales.

6. CAPÍTULO 2. IDENTIFICACIÓN Y CARACTERIZACIÓN DE LOS INDICADORES, HERRAMIENTAS, INSTRUMENTOS Y MODELOS PARA EL ANÁLISIS DE LA AMENAZA, VULNERABILIDAD Y RIESGO ASOCIADO A LA CONTAMINACIÓN HÍDRICA CON METALES PESADOS.

La contaminación hídrica por metales pesados es un problema ambiental y de salud pública de gran relevancia a nivel mundial porque afecta tanto la biodiversidad acuática y terrestre como a las comunidades humanas que dependen del recurso hídrico para su sustento diario. La subcuenca del río Quito hace parte de la cuenca del río Atrato declarado como sujeto de derechos mediante la Sentencia T-622, esta cuenca hace parte del Chocó Biogeográfico, conocido como *HotSpot* de la biodiversidad en Colombia; no obstante, presenta dinámicas socioambientales complejas debido a impactos ambientales intensos y extensos asociados con la alteración de la geomorfología fluvial y del régimen hidrológico, la contaminación por elementos potencialmente tóxicos como el mercurio, cromo, níquel, entre otros y la sedimentación, como consecuencia de la minería ilegal de oro (Palacios-Torres; Caballero-Gallardo; Olivero-Verbel, 2018).

Las revisiones bibliográficas sistemáticas (RBS) se han convertido en una herramienta fundamental para la síntesis de evidencia científica en diversos campos del conocimiento. A diferencia de las revisiones narrativas tradicionales, las RBS se caracterizan por su rigurosidad metodológica, transparencia y replicabilidad, lo que las convierte en un recurso invaluable para determinar el estado actual del conocimiento sobre un tema específico y tomar decisiones informadas (Conforto; Amaral; Silva, 2011).

Las RBS se definen como un proceso sistemático y explícito de búsqueda, evaluación y síntesis de estudios primarios relevantes para responder a una pregunta de investigación específica. Esta definición destaca tres elementos clave: sistematicidad, explicitud y síntesis. La aplicación de un protocolo predefinido y documentado guía cada paso del proceso, desde la definición de la pregunta de investigación hasta la integración de los resultados de estudios individuales en un marco coherente. Esto no solo facilita la transparencia en la selección de estudios y la evaluación de su calidad, sino que también permite a los lectores evaluar la rigurosidad de la revisión y la confiabilidad de los resultados obtenidos (Lame, 2019; Nightingale, 2009).

Los objetivos de una RBS incluyen sintetizar la evidencia disponible sobre un tema específico, evaluar la calidad de dicha evidencia, identificar vacíos de conocimiento y

proporcionar una base sólida para la toma de decisiones (Rosso Pinto; Hanai, 2023). En el caso de la cuenca del río Quito, la RBS busca identificar y caracterizar los aspectos socioambientales de amenazas y vulnerabilidades asociadas a la contaminación hídrica por metales pesados, así como recopilar herramientas, instrumentos y modelos de gestión de riesgo socioambiental aplicados en otras regiones con características comparables.

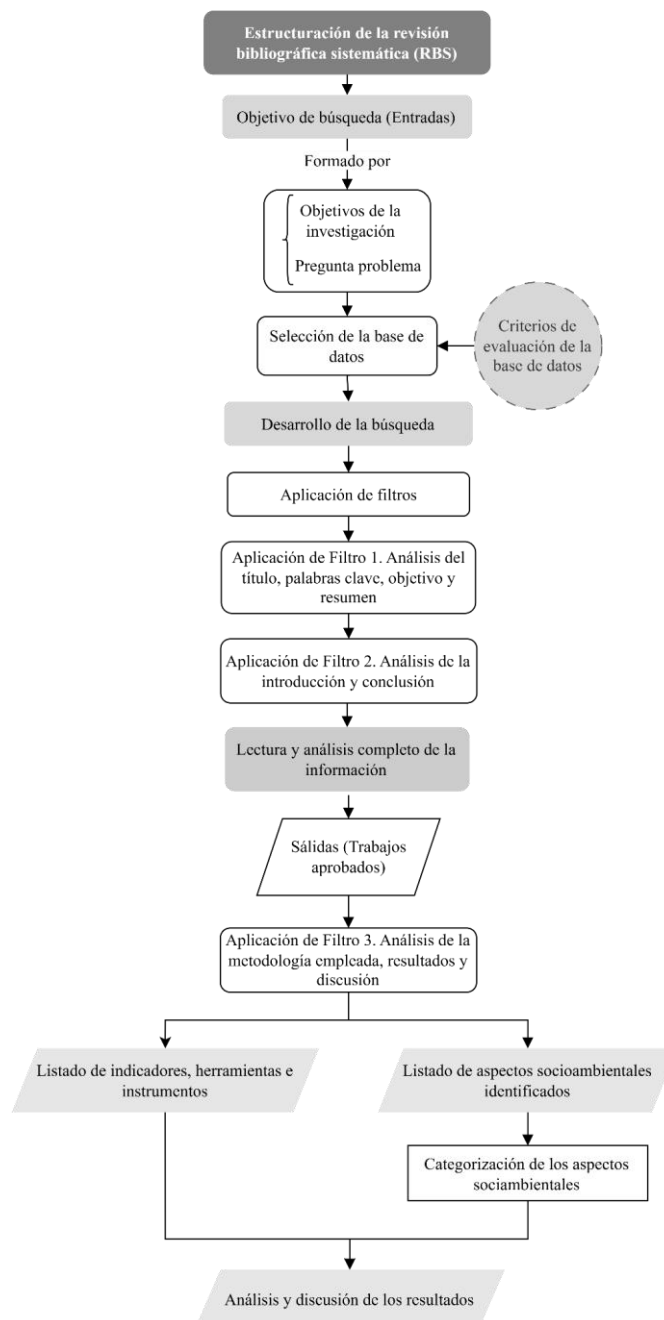
La contaminación por metales pesados, como el mercurio, cromo y níquel, representa una amenaza significativa para los ecosistemas acuáticos y la salud humana. Estas sustancias tóxicas pueden acumularse en los organismos vivos, causando efectos adversos que van desde daños neurológicos hasta enfermedades crónicas (Córdoba-Tovar et al., 2023a). En regiones como el Chocó, donde la minería de oro y otras actividades antrópicas están presentes, es necesario evaluar la sinergia entre las variables socioambientales que contribuyen a la vulnerabilidad de la cuenca y los niveles de contaminación que se evidencian. Este análisis requiere la recopilación y síntesis de información sobre los aspectos sociales y ambientales que caracterizan la problemática de contaminación por metales pesados en cuencas hidrográficas afectadas por minería, dando el contexto necesario para definir las variables que permiten llevar a cabo diagnósticos integrales (Worlanyo; Jiangfeng, 2021).

6.1. PROCEDIMIENTOS METODOLÓGICOS

La Revisión Bibliográfica Sistemática (RBS) permitió identificar, describir, caracterizar y analizar de manera simplificada y organizada referencias bibliográficas enfocadas en herramientas, instrumentos y modelos existentes de gestión de riesgos socioambientales relacionados con la contaminación del agua. Según Conforto, Amaral y Silva (2011), esta metodología tiene un carácter exploratorio, ya que permite generar ideas y pensamientos que enriquecen y sustentan nuevas teorías. Sin embargo, para que los resultados sean satisfactorios y representen un avance en el conocimiento científico, debe realizarse de manera estructurada y rigurosa (Conforto; Amaral; Silva, 2011). Sampaio y Mancini (2007), afirmaron que la revisión sistemática de la literatura es una metodología que proporciona un resumen de la evidencia relacionada con una estrategia de intervención específica, a través de la aplicación de métodos explícitos y sistematizados de búsqueda, evaluación crítica y síntesis de información, y cuya eficiencia depende en gran medida de una adecuada definición de palabras clave, campos, modos de búsqueda, límites de resultados, publicaciones periódicas, entre otros criterios. (Sampaio; Mancini, 2007).

Este capítulo presenta cuantitativa y cualitativamente las referencias bibliográficas existentes relacionadas con el tema de amenazas y vulnerabilidades socioambientales asociadas a la contaminación hídrica por metales pesados. Se llevó a cabo un riguroso proceso de búsqueda y selección de estudios, siguiendo un protocolo predefinido y documentado que asegura la sistematicidad, explicitud y síntesis de los datos. El siguiente flujograma presenta en detalle el esquema metodológico utilizado para el desarrollo de la RBS.

Figura 6. Flujograma metodológico para el desarrollo de la RBS



Fuente: Elaboración propia (2025)

6.1.1. Planificación de la revisión bibliográfica sistemática

La Revisión Bibliográfica Sistemática se realizó con el objetivo de identificar y caracterizar las amenazas y vulnerabilidades socioambientales asociadas a la contaminación por metales pesados existentes en la cuenca del río Quito (departamento del Chocó, Colombia). Asimismo, se buscó recopilar herramientas, indicadores, instrumentos y modelos de gestión de riesgos socioambientales, desarrollados y/o aplicados en diferentes regiones hidrográficas del mundo con dinámicas ambientales comparables al área de estudio. Esta RBS se llevó a cabo considerando los siguientes pasos: i) insumos o planificación; ii) procesamiento o ejecución de la investigación; y iii) productos o resultados esperados. Estos pasos forman el sistema de Entrada-Procesamiento-Salida en el que se basa la metodología, cuya función es asegurar que los datos recopilados sean consistentes con los objetivos iniciales de la revisión (Levy; Ellis, 2006). A continuación se describe el sistema de Entrada-Procesamiento-Salida diseñado para esta investigación.

6.1.1.1. Entradas

En cualquier enfoque sistemático, una planificación rigurosa y de calidad en la definición de insumos resulta fundamental para garantizar la eficacia de los resultados y el cumplimiento de los objetivos propuestos, permitiendo obtener información relevante y alineada con el tema de estudio y asegurando la coherencia y la solidez del proceso investigativo (Levy; Ellis, 2006). En esta sección se definieron los objetivos y la estrategia de búsqueda, incluyendo la descripción del problema, las preguntas que se espera responder a través de esta revisión, la forma de selección de las bases de datos, los criterios de búsqueda de información y los criterios para la selección y análisis de estudios relacionados con el tema.

i. Objetivos de la RBS

La RBS fue la metodología utilizada para cumplir con el segundo objetivo específico de esta tesis doctoral, cuyo enunciado es el siguiente: identificar y caracterizar los indicadores, herramientas, instrumentos y modelos para el análisis de la amenaza, vulnerabilidad y riesgo asociado a la contaminación del agua con metales pesados.

ii. Planteamiento del problema de la RBS

La planificación de cuencas hidrográficas se basa en la existencia de información de calidad como elemento clave para cualquier medida de control y toma de decisiones. En este

sentido, la identificación de aspectos socioambientales que influyen en las amenazas y la vulnerabilidad del territorio es uno de los primeros pasos para la construcción de una estructura sistémica que funcione como herramienta para la gestión del riesgo socioambiental en cuencas afectas por minería.

La identificación de experiencias exitosas en la gestión del riesgo socioambiental en diversas regiones permitió recopilar los diferentes métodos, herramientas, instrumentos y/o modelos que existen y tienen el potencial de ser utilizados y/o adaptados a un contexto específico, como la subcuenca del río Quito en el departamento del Chocó (Colombia). Según Cerezini, Rosso y Hanai (2017) "Para alcanzar el paradigma de la gestión integrada y sostenible de los recursos hídricos, es necesario utilizar herramientas que contribuyan a su implementación y organización". Por ello, a través de la RBS se buscó identificar no solo los aspectos asociados a las amenazas y la vulnerabilidad de cuencas contaminadas o afectadas por minería, sino también un conjunto significativo de herramientas, indicadores, instrumentos y/o modelos de gestión del riesgo que integren las dinámicas socioambientales relacionadas con la contaminación por metales pesados. Las preguntas problema propuestas en el planteamiento de esta RBS fueron:

- ¿Qué aspectos se deben tener en cuenta para caracterizar las amenazas y vulnerabilidades de la cuenca del río Quito?
- ¿Cuáles son las sinergias entre los aspectos socioambientales asociados a la contaminación por metales pesados en la cuenca del río Quito?
- ¿Qué herramientas, indicadores, instrumentos y/o modelos de gestión de riesgos se han utilizado con éxito en otros países para la planificación y gestión de cuencas hidrográficas con contextos similares?

iii. Selección de bases de datos.

Para esta investigación se escogió la base de datos Scopus; tradicionalmente utilizada en investigaciones relacionadas con las ciencias ambientales, ya que es una de las fuentes de información multidisciplinar más confiable y completa del mundo, la cual proporciona estudios de diferentes revistas sobre temas relacionados con la ciencia, la tecnología, la biomedicina y otras áreas, garantizando la calidad y validación científica del conocimiento (Granda-Orive et al. 2013). El acceso a esta base de datos se hizo a través de la plataforma de la Universidad Federal de São Carlos, Brasil.

iv. Criterios de evaluación de las bases de datos elegidas

Se utilizaron revistas indexadas, con estratos indicativos de calidad no inferiores a B para Ciencias Ambientales y/o Ingeniería.

v. Estrategias de búsqueda

En el marco de esta estrategia se definieron los lineamientos para llevar a cabo la búsqueda de artículos, los cuales se presentan a continuación:

- **Idioma de los estudios**

Las palabras clave se utilizaron en inglés, pero se analizaron todos los estudios obtenidos en inglés, español o portugués.

- **Período de tiempo**

La búsqueda se realizó por un periodo máximo de 10 años. Es posible encontrar artículos desde el año 2013 hasta el 2023 (periodo en que se realizó la RBS). No obstante, se aclara que en el desarrollo de la tesis doctoral se incluyeron referencias de los años 2024 a 2025.

- **Número de campos**

Las búsquedas se realizaron con un máximo de tres campos.

- **Tipo de archivo**

Los archivos escogidos fueron artículos finalizados de acceso abierto o acceso a través de la plataforma de la Universidad Federal de São Carlos.

- **Tipo de búsqueda**

Las búsquedas se realizaron a partir del filtro que incluye el resumen, palabras clave y título.

vi. Selección de palabras clave.

Se definieron dos sub-objetivos acordes a los propósitos de la RBS. Las palabras clave se establecieron de acuerdo con estos planteamientos, siendo el primero de ellos (llamado

objetivo A) la búsqueda de aspectos relacionados con amenazas, vulnerabilidades y riesgos socioambientales, y el segundo (llamado objetivo B) la búsqueda de herramientas, instrumentos y/o o modelos de gestión de riesgos socioambientales que han sido aplicados con éxito en diferentes regiones del mundo. Las tablas 9 y 10 muestran las palabras clave elegidas en inglés.

Tabla 9. Selección de las palabras claves para el objetivo A

Campo 1	Campo 2	Campo 3
Heavy metal contamination	Water	Threat
		Hazard
	Environmental health	Vulnerability
		Risk

Fuente: Elaboración propia (2025)

Tabla 10. Selección de las palabras claves para el objetivo A

Campo 1	Campo 2	Campo 3
Contamination	Water	Quito River
		Atrato
	Environmental health	Chocó

Fuente: Elaboración propia (2025)

Para el objetivo A, se seleccionaron términos como: contaminación por metales pesados, combinados con palabras clave asociada a las matrices ambientales donde interesa realizar la búsqueda, las cuales son: agua y la salud humana, así mismo la combinación de palabras clave incluyó un tercer campo que incluye los términos asociados a gestión del riesgo: peligro, amenaza, vulnerabilidad y riesgo. Estos descriptores permitieron acotar la búsqueda a estudios que integren variables relacionadas con la contaminación del agua por metales pesados, los factores de riesgo asociados a ese impacto y los efectos diferenciados sobre sistemas ecológicos y comunidades humanas. La inclusión de los conceptos de amenaza, vulnerabilidad y riesgo permitió integrar a la búsqueda dimensiones físicas, sociales y económicas en la configuración del riesgo socioambiental.

La Tabla 10 presenta una estructura similar a las palabras claves de la Tabla 9, con la diferencia en que en esta se incluye el nivel regional, con el fin de identificar información asociada específicamente a la cuenca del río Atrato.

Tabla 11. Selección de las palabras clave para el objetivo B

Campo 1	Campo 2	Campo 3
Tool	Risk management	Heavy metal
Instrument		Water pollution
Model		
Framework		

Fuente: Elaboración propia (2025)

Respecto al objetivo B las palabras clave planteadas en el campo uno corresponde al objeto central de la búsqueda, que son: herramientas, instrumentos, modelos y modelos conceptuales. Estos términos permiten acceder a literatura técnica especializada sobre metodologías de análisis de riesgo, modelos predictivos, instrumentos de evaluación ambiental, herramientas de modelación, indicadores de contaminación y marcos conceptuales aplicados a la gestión de riesgos en cuencas hidrográficas afectadas por Elementos Potencialmente Tóxicos. La estructura de búsqueda facilita la identificación de estudios que documentan el diseño, validación y aplicación de herramientas empleadas en contextos de contaminación, permitiendo establecer criterios comparativos, análisis de las funcionalidades de las herramientas y su posible transferencia al caso de estudio del río Quito, subcuenca del río Atrato.

vii. *Strings* de búsqueda

A continuación, se presentan las combinaciones de palabras clave utilizadas en la RBS para cada objetivo. Cada cadena de palabras recibió un código con el fin de estructurar bases de datos con los resultados de cada búsqueda.

Tabla 12. *Strings* Objetivo A

Código	<i>Strings</i>
AA	Heavy metal contamination + water + threat
AB	Heavy metal contamination + water + hazard+Not soil+Not groundwater+Not coast
AC	Heavy metal contamination + water + vulnerability + Not coast + Not groundwater
AD	Heavy metal contamination + Environmental health+ Threat+ Not coast+Not groundwater
AE	Heavy metal contamination + environmental health + hazard + water + NOT (groundwater, coast, bay, soil, crop)
AF	heavy metal contamination + environmental health + vulnerability + water + NOT (groundwater, coast, bay, soil, crop)

AG	Contamination + water + Quito river
AH	Contamination + water + Atrato
AI	Contamination + water + Chocó
AJ	contamination + environmental health+ Quito River
AK	Heavy metal contamination + environmental health+ Atrato River
AL	heavy metal contamination + environmental health+Chocó
Fuente: Elaboración propia (2025)	

Tabla 13. *Strings* objetivo B

Código	<i>Strings</i>
BA	Tool+ Risk management+ heavy metal+NOT (groundwater, coast, soil)
BB	Tool+ Risk management+ water pollution + NOT (groundwater, coast, bay, soil, crop)
BC	Instrument+ Risk management+ heavy metal+NOT (groundwater, coast, soil)
BD	Instrument+ Risk management+ water pollution+NOT (groundwater, coast, soil)
BE	Model+ Risk management+ heavy metal+NOT (groundwater, coast, soil)
BF	Model+ Risk management+water pollution + NOT (groundwater, coast, bay, soil, crop, sea, microbial)
BG	Framework+ Risk management+ heavy metal+NOT (groundwater, coast, soil, crop)
BH	Framework+ Risk management+ water pollution+NOT (groundwater, coast, soil, crop)
Fuente: Elaboración propia (2025)	

6.1.1.2. Ejecución de la búsqueda.

i. Criterios de selección de estudios.

Para seleccionar estudios fue necesario leer el título y las palabras clave y comprobar la posibilidad de descargar el artículo completo en formato PDF, considerando los accesos mediante la plataforma de la UFSCar. La lectura del título y palabras clave indicó si el estudio tenía relación con el tema de interés, para ello se consideran los siguientes criterios:

- Título relacionado con el tema específico de la investigación: amenazas, vulnerabilidad y riesgos asociados a la contaminación por metales pesados en cuencas hidrográficas.

- Título relacionado con diferentes indicadores, herramientas, instrumentos y/o modelos de gestión de riesgos socioambientales.

- Si el título tiene alguna de las palabras claves colocadas en el campo 4 (río Quito, río Atrato, Chocó)

- Si las palabras clave del artículo contienen alguna de las palabras clave que se utilizaron en la búsqueda en alguno de los campos.

ii. Criterios de análisis de estudios.

Una vez seleccionado el estudio se realizó un análisis para la obtención de la información requerida. Este análisis constó de tres etapas de carácter eliminatorio, de tal manera que si el estudio no cumplía con alguna de las preguntas formuladas, este era descartado.

- **Análisis 1: lectura del título, resumen y palabras clave.**

El análisis 1 se realizó utilizando el filtro presentado en la siguiente tabla 14. El objetivo de este análisis fue verificar si el estudio realmente estaba relacionado con el tema de investigación, identificando si presenta un instrumento, herramienta o indicador o si tiene un objetivo relacionado a la identificación, evaluación o determinación de riesgos asociados a la contaminación por metales pesados en cuencas hidrográficas.

Tabla 14. Filtro 1- Análisis del título, objetivo y resumen

Ocurrencia	Título del estudio	Base de datos	¿El título, el resumen o las palabras clave indican que el trabajo se refiere a la identificación, evaluación o determinación de amenazas, vulnerabilidades y riesgos asociados con la contaminación del agua por metales pesados?	¿Se presenta una herramienta, instrumento o modelo de gestión de riesgos sociales y ambientales en el título, resumen o palabras clave?	¿El objetivo del trabajo está asociado al estudio de amenazas, vulnerabilidades y riesgos socioambientales derivados de la contaminación del agua con metales pesados?
------------	--------------------	---------------	--	---	--

Fuente: Elaboración propia (2025)

- **Análisis 2: Revisión de la introducción y conclusión**

El análisis 2 se realizó utilizando el filtro presentado en la tabla 15. El objetivo de este análisis fue estudiar el marco teórico del artículo a través de la lectura de la introducción y los principales resultados obtenidos a través de la lectura de la conclusión, con el fin de identificar y caracterizar aspectos socioambientales asociados a amenazas, vulnerabilidades y riesgos derivados de la contaminación del agua con metales pesados.

Tabla 15. Filtro 2 – Análisis de la introducción y conclusión

Título del estudio	En la introducción del estudio, ¿se indica un marco teórico asociado a las amenazas, vulnerabilidades y riesgos socioambientales de la contaminación del agua con metales pesados?	En las conclusiones, ¿muestra resultados sobre las amenazas, vulnerabilidades y riesgos socioambientales de la contaminación del agua con metales pesados?	¿Es posible identificar aspectos que condicionan las amenazas, vulnerabilidades y riesgos socioambientales de la contaminación del agua con metales pesados?
--------------------	--	--	--

Fuente: Elaboración propia (2025)

• **Análisis 3: lectura del texto completo**

El análisis 3 se realizó utilizando una tabla de síntesis (filtro 3) para recopilar la información relevante y facilitar las discusiones referentes al resultado de la RBS. Este análisis incluyó una lectura completa del texto, prestando especial atención a la metodología utilizada y los resultados obtenidos. El objetivo fue identificar los diferentes aspectos socioambientales relacionadas con la contaminación con metales pesados, así como las herramientas, indicadores, instrumentos, modelos y métodos utilizados para alcanzar los resultados.

Tabla 16. Análisis del texto completo

¿La investigación presenta, prueba, evalúa, propone, aplica, utiliza, valida, calibra, estudia (entre otros verbos) una herramienta, instrumento, modelo y/o índice para identificar, caracterizar, evaluar, estudiar, analizar, gestionar (entre otros verbos similares) las amenazas, vulnerabilidades y riesgos socioambientales asociados a la contaminación de las aguas superficiales por metales pesados en las cuencas hidrográficas?	Nombre de la herramienta identificada ⁴	Aspectos socioambientales relacionados con la contaminación del agua por metales pesados identificados en el texto
---	--	--

Fuente: Elaboración propia (2025)

⁴ La palabra herramienta en esta tabla comprende: indicadores, instrumentos, modelos y métodos. En los resultados lo referente a las herramientas encontradas también incluirán cualquier de los términos anteriores. Se selecciona la palabra herramienta para unificar los términos, teniendo como fundamento a Terra Cerezini et al. 2025 (Terra Cerezini et al., 2025).

Para el caso de las herramientas se tuvo en cuenta:

- Herramientas computacionales: softwares, SIG, modelos conceptuales, modelos matemáticos, algoritmos, videojuegos, páginas web
- Herramientas educativas: estrategias pedagógicas, de formación, modelos pedagógicos (metodologías cualitativas, componente social)
- Herramientas de planificación y/o gestión: planes de manejo u ordenamiento, planes de desarrollo, estrategias, programas, sistemas de gestión, índices, indicadores, guías técnicas.
- Herramientas legales: normas, decretos, políticas públicas.

Para el caso de los aspectos socioambientales se tuvo en cuenta la identificación de aquellos asociados a la amenaza, vulnerabilidad o riesgo que generan los metales pesados en los cuerpos de agua. Posteriormente, se llevó a cabo una normalización con el objetivo de simplificar y unificar aspectos relacionados, asegurando una terminología coherente y que permita la cuantificación. Esta etapa fue fundamental, toda vez que los diferentes autores de los artículos incluidos en la RBS utilizan diferentes denominaciones para describir un mismo aspecto. Finalmente los aspectos fueron agrupados por categorías más amplias.

6.2.RESULTADOS Y DISCUSIONES

El capítulo de resultados y discusiones se presenta de acuerdo con los filtros utilizados en cada proceso de implementación de la RBS en la base de datos Scopus, partiendo de la estrategia de búsqueda descrita en la metodología. Este capítulo es el único de la tesis doctoral que unifica los resultados obtenidos con las discusiones debido a la necesidad de describir y explicar las cifras obtenidas en cada etapa, llamando a reflexiones pertinentes que facilitan la interpretación del lector y el mensaje que el autor quiere transmitir.

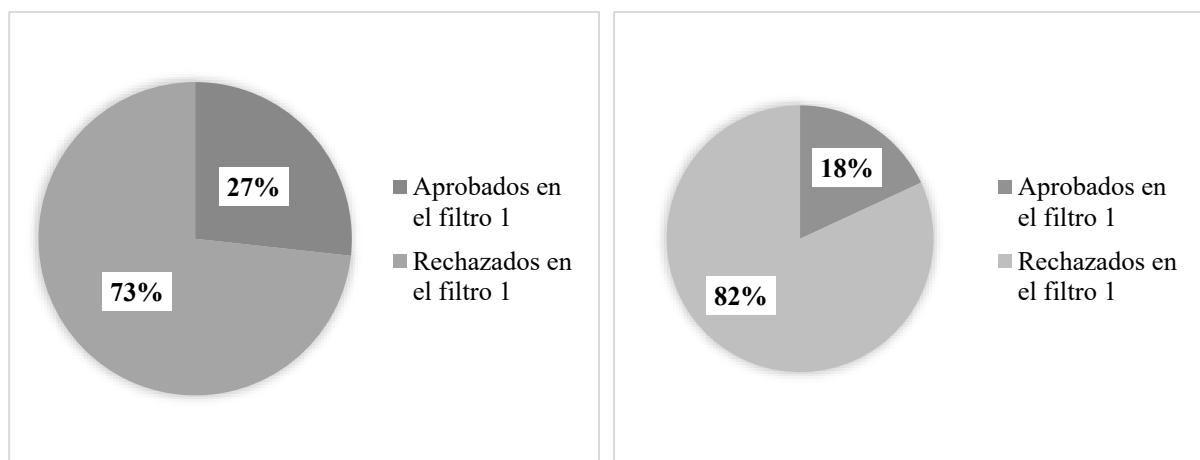
6.2.1. Resultados de la aplicación del filtro 1: análisis del título, objetivo, resumen.

En esta etapa de la RBS se realizó la preselección de los artículos encontrados mediante las diferentes *strings* de búsqueda definidas, evaluando su pertinencia y su relación con el tema de estudio. Este filtro fue necesario para excluir aquellos artículos que, debido a terminologías similares y al funcionamiento de los algoritmos de las bases de datos, aparecieron entre los resultados pero no contribuían directamente a los objetivos planteados.

A partir de las *strings* de búsqueda correspondientes al objetivo A, orientado a identificar aspectos relacionados con amenazas, vulnerabilidades y riesgos socioambientales derivados de la contaminación por metales pesados, se obtuvieron inicialmente 598 artículos. De estos, 209 se encontraban duplicados entre los distintos conjuntos de palabras clave, por lo que se identificaron 389 artículos para aplicar el Filtro 1. En cuanto al objetivo B, enfocado en la identificación de herramientas, indicadores o instrumentos para la gestión del riesgo socioambientales asociados a contaminación por metales pesados, se hallaron 368 artículos, de los cuales 75 eran repetidos, resultando en 293 artículos distintos para la misma etapa de filtrado.

De acuerdo con la tabla 14, el filtro 1 buscó verificar el cumplimiento de por lo menos uno de los tres requisitos de interés para determinar la pertinencia del artículo encontrado con relación al tema de esta investigación. Los resultados de los artículos seleccionados para el objetivo A y B se presentan en la Figura 7.

Figura 7. Resultados de la aplicación del Filtro 1



A. Resultados del filtro 1 para el objetivo A

B. Resultados del filtro 1 para el objetivo B

Fuente: Elaboración propia (2025)

Tal como se presenta en la Figura 7, se evidencia un alto porcentaje de artículos descartados tras aplicar los criterios definidos en la Tabla 14. Este resultado destaca la importancia de esta etapa dentro del proceso de Revisión Bibliográfica Sistemática, ya que, a pesar de que la estrategia de búsqueda fue cuidadosamente delimitada, el amplio volumen de publicaciones relacionadas con la temática puede generar resultados no pertinentes debido a la presencia de términos análogos o ambigüedades propias de los algoritmos de búsqueda de la base de datos Scopus. En este sentido, la aplicación del Filtro 1 fue esencial para garantizar la

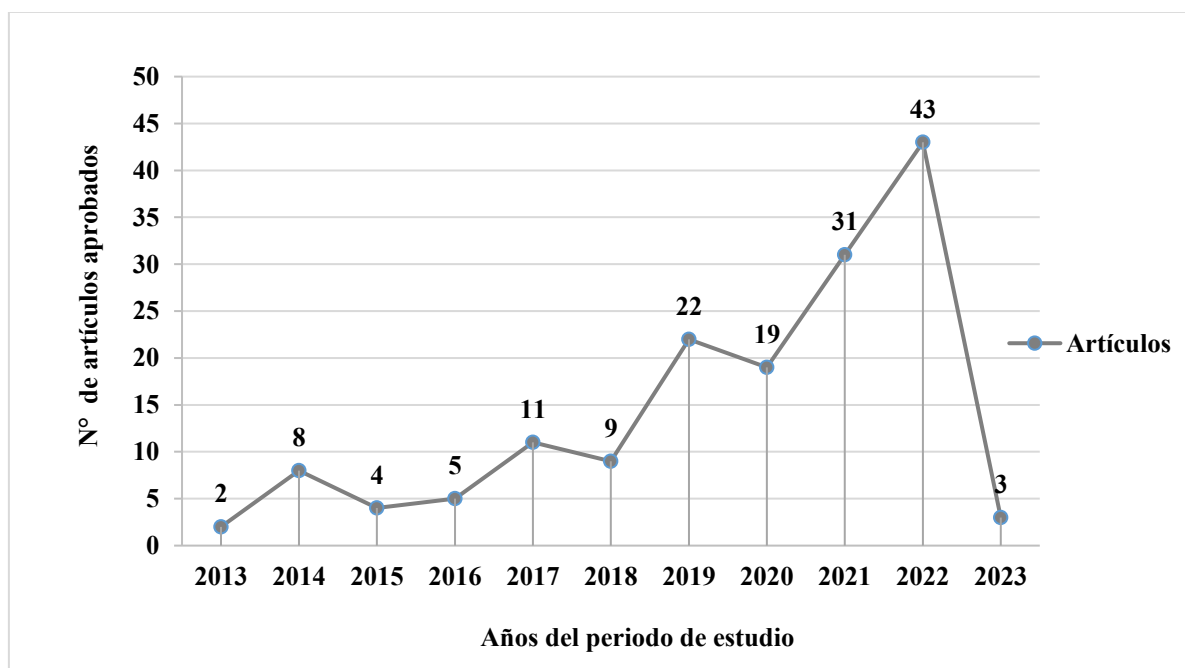
calidad y pertinencia del corpus bibliográfico seleccionado. Como resultado de esta depuración, se seleccionaron 104 artículos relacionados con el objetivo A y 53 con el objetivo B, para un total de 157 artículos que avanzaron a la siguiente fase de análisis correspondiente al Filtro 2.

Los 157 artículos seleccionados tras la aplicación del filtro 1 fueron analizados en función de las *strings* de búsqueda empleadas, con el propósito de identificar cuáles conjuntos de palabras clave generaron la mayor cantidad de artículos aprobados. Para el Objetivo A, la *string* AB, compuesta por los términos: “*Heavy metal contamination + water + Hazard + NOT soil + NOT groundwater + NOT coast*”, fue la que produjo más resultados relevantes, lo que evidencia la importancia del término “Hazard” en la recopilación de literatura pertinente para este objetivo.

En el caso del Objetivo B, los resultados fueron más homogéneos entre las tres *strings* utilizadas. Las combinaciones BE (“*Model + Risk management + heavy metal + NOT (groundwater, coast, soil)*”), BH (“*Framework + Risk management + water pollution + NOT (groundwater, coast, soil, crop)*”) y BB (“*Tool + Risk management + water pollution + NOT (groundwater, coast, bay, soil, crop)*”) aportaron un número similar de artículos aprobados. Esta consistencia evidencia que los términos “model”, “tool” y “framework” son ampliamente utilizados en la literatura científica en inglés para referirse a enfoques metodológicos aplicados en la evaluación de amenaza, vulnerabilidad y riesgo socioambiental, reforzando su pertinencia dentro de las estrategias de búsqueda diseñadas para este objetivo.

Finalmente, con respecto a los años de publicación en el periodo de estudio de 2013 a 2023, tanto para las búsquedas del Objetivo A como del B, se notó un crecimiento estable en el número de artículos indicando aumento de interés referente a la generación de información asociada con el tema de esta investigación. Se evidenció una disminución entre los años 2020 y 2021, posiblemente asociados a la pandemia por COVID-19 (Raynaud et al., 2021). La Figura 8 muestra la clasificación de los 157 artículos aprobados en el filtro 1, distribuidos por año.

Figura 8. Clasificación de artículos aprobados por año



Fuente: Elaboración propia (2025)

6.2.2. Resultados de la aplicación del filtro 2: Análisis de la introducción y conclusión.

El filtro 2 tuvo como propósito profundizar en la evaluación del contenido de los estudios para determinar su grado de pertinencia y aporte a los objetivos de la RBS. Este filtro implicó un análisis cualitativo de la introducción y las conclusiones de cada artículo, con base en tres preguntas clave (ver Tabla 15), orientadas a identificar si el estudio presentaba un marco teórico explícito sobre las amenazas, vulnerabilidades y riesgos socioambientales relacionados con la contaminación del agua por metales pesados; si sus conclusiones ofrecían resultados concretos sobre esta temática, las dimensiones del riesgo y los factores que lo componen (amenaza y vulnerabilidad); y si se lograban identificar aspectos que condicionan dichas problemáticas en los contextos evaluados con enfoque socioambiental.

Este segundo nivel de análisis fue fundamental para garantizar la solidez teórica y la obtención de resultados relevantes y afines a la temática de interés, permitiendo depurar artículos que, si bien superaron el primer filtro, no abordaban de manera sustantiva el tema de amenaza, vulnerabilidad y/o riesgo asociado a la contaminación del agua por metales pesados desde una perspectiva coherente con los objetivos definidos en la RBS.

Como resultado de esta depuración, se aprobaron 98 artículos, de los cuales 75 correspondieron al Objetivo A, enfocado en la caracterización de amenazas, vulnerabilidades y

riesgos socioambientales, y 23 al Objetivo B, centrado en la identificación de herramientas, indicadores y modelos de gestión del riesgo. Por su parte, 59 artículos fueron descartados.

Respecto al resultado por *strings* de búsqueda en esta etapa, se mantuvo la tendencia identificada en el Filtro 1. Para el Objetivo A, la *string* AB, compuesta por los términos “*Heavy metal contamination + water + Hazard + NOT soil + NOT groundwater + NOT coast*”, fue nuevamente la que generó el mayor número de artículos aprobados, confirmando la relevancia del término *Hazard* en la identificación de estudios robustos sobre el riesgo socioambiental (Lim; Foo, 2021).

En el caso del Objetivo B, aunque en la etapa anterior los resultados fueron homogéneos entre las tres *strings* utilizadas (BE, BH y BB), en el Filtro 2 la *string* BE, integrada por los términos “*Model + Risk management + heavy metal + NOT (groundwater, coast, soil)*”, se destacó con un mayor número de artículos seleccionados. Este hallazgo sugiere que el uso del término *Model* permitió recuperar investigaciones con mayor profundidad metodológica y enfoque analítico, particularmente valiosas para identificación de herramientas asociados al análisis de amenaza, vulnerabilidad y riesgo socioambiental en cuencas hidrográficas afectadas por la contaminación con metales pesados.

Los 98 artículos científicos resultantes de esta etapa fueron analizados en su totalidad con el fin de identificar esas herramientas y extraer los aspectos socioambientales considerados en estudios de amenaza, vulnerabilidad y/o riesgo socioambiental derivado de la contaminación por metales pesados. El Anexo 1 presenta un listado de los artículos finalmente escogidos

6.2.3. Resultados de la aplicación del tercer análisis: lectura del texto completo

Con el objetivo de profundizar en la comprensión del enfoque y contenido de los artículos seleccionados tras la aplicación del filtro 2, se llevó a cabo una tercera etapa de análisis, consistente en la lectura completa de los 98 estudios aprobados. Esta fase metodológica no constituyó un filtro adicional, sino un ejercicio de caracterización detallada, orientado a sistematizar la información más relevante para la discusión y consolidación de los resultados de la RBS.

Para ello, se empleó una tabla de síntesis (ver Tabla 16), que permitió organizar y clasificar la información clave extraída de cada estudio. Este análisis prestó especial atención a dos aspectos fundamentales: (i) la identificación de herramientas, instrumentos, modelos, índices o métodos empleados o discutidos en los artículos para abordar la problemática de las

amenazas, vulnerabilidades y riesgos socioambientales derivados de la contaminación del agua por metales pesados; y (ii) los aspectos socioambientales caracterizados en cada estudio en relación con dicha problemática.

A partir de este ejercicio se estableció que 76 de los 98 artículos presentan o hacen referencia explícita a una herramienta, instrumento, modelo o índice vinculado con el análisis, evaluación o gestión del riesgo socioambiental. La clasificación incluyó tanto aquellos estudios que aplicaron directamente estas herramientas en sus metodologías, como aquellos que las mencionaban con base en experiencias previas o como referentes conceptuales.

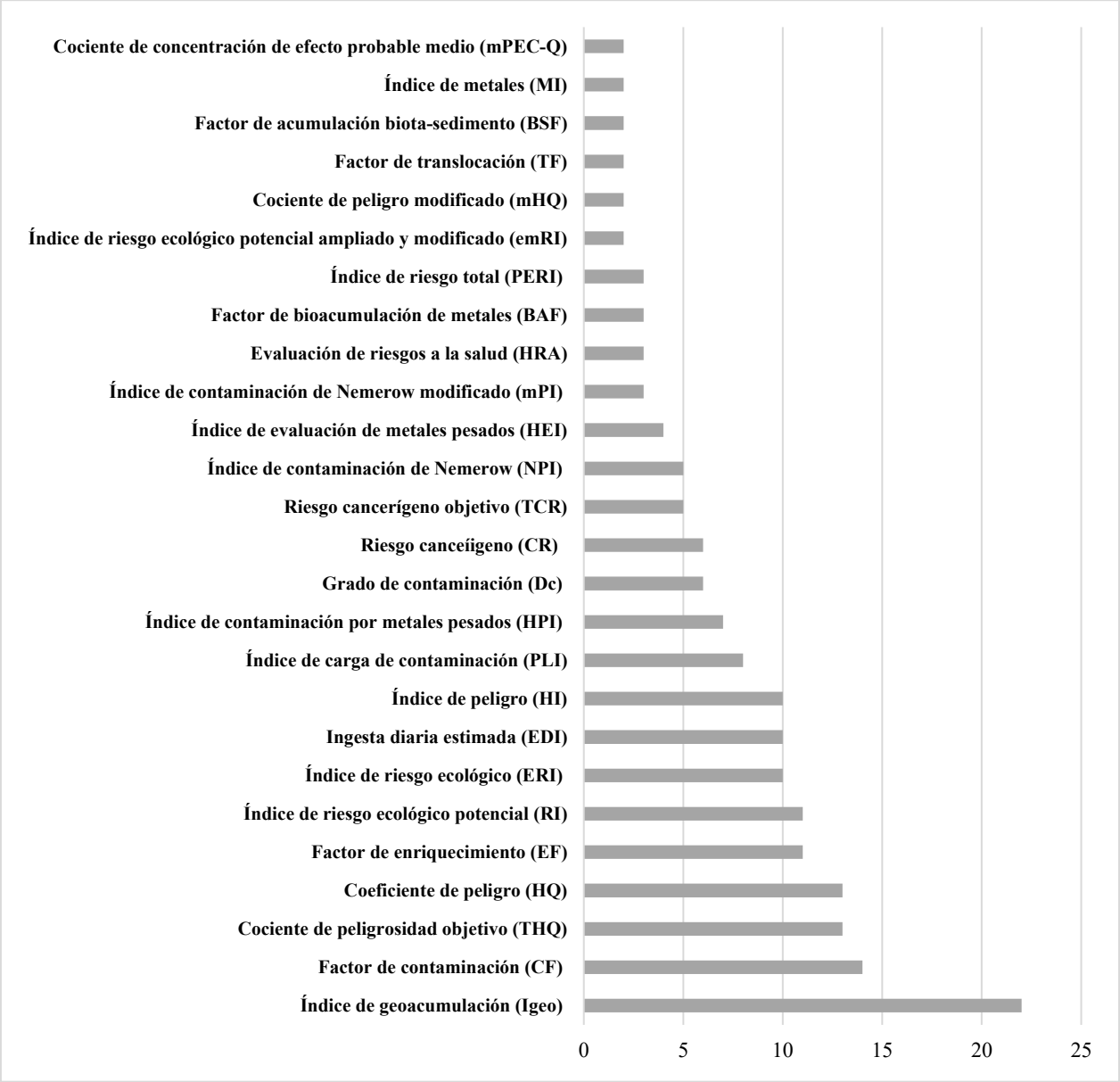
Cabe destacar que, al igual que en las etapas anteriores, se realizó un análisis complementario con base en las *strings* de búsqueda empleadas en los objetivos A y B, lo cual permitió corroborar la consistencia temática y metodológica a lo largo del proceso. En este sentido, los artículos recuperados mediante la *string* AB (para el Objetivo A) y especialmente la *string* BE (para el Objetivo B) fueron los que con mayor frecuencia hicieron referencia a herramientas de gestión del riesgo, manteniéndose la misma tendencia observada en el Filtro 2.

Las herramientas identificadas a partir de los 98 artículos analizados se presentan de en la figura 9. Este resultado surge de un primer ejercicio de sistematización y conteo directo de las menciones realizadas en los textos, sin que se haya efectuado aún un análisis independiente y descriptivo de cada herramienta. Cabe resaltar que solo se muestran aquellas herramientas que se encontraron por lo menos 2 veces en los artículos seleccionados, siendo un total de 26 herramientas, no obstante al incluir las mencionadas una vez en los artículos el número asciende a 81 herramientas identificadas.

De acuerdo con la RBS, la herramienta más utilizada en estudios asociados a la amenaza, vulnerabilidad o riesgo derivado de la contaminación por metales pesados fue el índice de geoacumulación (Igeo) con 22 repeticiones, seguido por el factor de contaminación y los cocientes de peligro y peligrosidad objetivo (Marrugo-Negrete et al., 2024). Estas herramientas fueron clasificadas en tres grandes categorías de acuerdo con su naturaleza y propósito: índices o indicadores, modelos conceptuales o instrumentos de gestión, y software o herramientas computacionales. La clasificación mostró un predominio marcado de herramientas tipo índice, con 63 en esta categoría, seguidos por 17 modelos conceptuales o instrumentos de gestión, y apenas 1 herramienta computacional claramente identificada. Este resultado refleja una orientación metodológica predominante basada en la medición cuantitativa de la amenaza,

dejando en segundo plano el análisis de las dimensiones más estructurales del riesgo, validando la pregunta problema y justificación de esta tesis doctoral.

Figura 9. Herramientas identificadas en al menos 2 artículos seleccionados



Fuente: Elaboración propia (2025)

A partir de la Figura 9, se evidencia una marcada concentración en herramientas orientadas exclusivamente a la caracterización de la amenaza. Algunas de ellas, como el Índice de Geoacumulación (Igeo), el Factor de Contaminación (CF), el Cociente de Peligrosidad Objetivo (THQ), el Coeficiente de Peligro (HQ) y el Índice de Riesgo Ecológico Potencial (RI) son las más recurrentes entre los métodos usados para la investigación científica en esta temática. Estas metodologías se centran en cuantificar la presencia, concentración o toxicidad

de los metales en distintos medios ambientales, así como en estimar el riesgo a la salud o ecológico asociado con su exposición. Su amplia adopción en la literatura responde, en parte, a su simplicidad matemática, su compatibilidad con estándares internacionales y su potencial en la generación de resultados comparables entre regiones o períodos (Godt et al., 2006; Khanna, 2000; Muller, 1969; Tamim et al., 2016).

No obstante, esta concentración técnica en la amenaza evidencia un vacío importante en la incorporación de la vulnerabilidad como factor del riesgo socioambiental. En la práctica, estas herramientas no consideran aspectos fundamentales que configuran la vulnerabilidad, como la exposición diferenciada de las comunidades a las fuentes de contaminación, la dependencia socioeconómica de los recursos naturales contaminados, las limitaciones en el acceso a servicios básicos como agua potable o atención en salud, ni las capacidades institucionales o comunitarias para responder al riesgo (Cutter, 1996a; Kelly; Adger, 2000; Müller-Grabherr et al., 2014). Esto conlleva a reflexionar sobre las técnicas idóneas para entender por qué ciertos territorios, aún con niveles similares de contaminación, presentan consecuencias sociales o ecológicas más severas.

En contextos de alta complejidad socioambiental como la cuenca del río Atrato y, particularmente, la del río Quito, donde la minería ilegal ha generado graves procesos de contaminación por metales pesados, la exclusión del componente de vulnerabilidad en las herramientas de evaluación del riesgo conduce a interpretaciones parciales que limitan su utilidad. Al centrarse únicamente en la presencia del contaminante, se ignoran factores sociales, económicos e institucionales que amplifican los impactos y condicionan la exposición de las comunidades. En territorios marcados por pobreza, debilidad institucional y fuerte dependencia de los ecosistemas contaminados, esta omisión restringe la comprensión integral del riesgo. Como resultado, la toma de decisiones basada solo en estos instrumentos puede derivar en intervenciones ineficaces, que no responden a las condiciones reales del territorio (Gaviria; Angel-Amaya, 2020; Marrugo-Negrete et al., 2023a).

6.2.3.1. Análisis de las herramientas identificadas

A partir de los resultados de herramientas identificadas se pudo evidenciar que los índices e indicadores constituyen el conjunto más utilizado y recurrente. Estas herramientas están diseñadas principalmente para evaluar la presencia, intensidad y toxicidad de contaminantes en matrices ambientales como agua, sedimentos y suelo, así como para estimar

el riesgo toxicológico y ecológico asociado. Dentro de este grupo se destacan herramientas ampliamente utilizadas como el Índice de Geoacumulación (Igeo), el Factor de Contaminación (CF), el Factor de Enriquecimiento (EF) y el Índice de Evaluación de Metales Pesados (HEI). Estas permiten comparar concentraciones medidas frente a valores de fondo o normativos, clasificando el grado de contaminación (Hassaan; Nemr; Madkour, 2016; Parvez et al., 2023; Prasad Ahirvar et al., 2023).

Otros indicadores como el Índice de Riesgo Ecológico Potencial (RI), el Índice de Riesgo Ecológico (ERI) y el Índice de Riesgo Total (PERI) amplían el análisis al considerar el potencial impacto de los contaminantes sobre los ecosistemas. En el ámbito de la salud humana, herramientas como el Cociente de Peligrosidad Objetivo (THQ), el Coeficiente de Peligro (HQ), la Ingesta Diaria Estimada (EDI) y el Índice de Peligro (HI) son utilizadas para estimar riesgos no cancerígenos y cancerígenos derivados de la exposición a metales a través de diferentes rutas (Córdoba-Tovar et al., 2023a; Maftai et al., 2019a; Ugochukwu et al., 2019a).

Un subconjunto menor pero significativo de herramientas corresponde a modelos conceptuales e instrumentos de gestión, que permiten interpretar el riesgo desde una lógica más sistémica e integral. Destacan en este grupo el Modelo de Fuerza Motriz - Presión - Estado - Impacto - Respuesta (DPSIR), que articula causalidad, consecuencias y mecanismos de respuesta, y el Modelo de Simulación Basado en Agentes (ABM), que introduce dinámicas sociales en el análisis ambiental (González-Morales; Fernández-Pozo; Rodríguez-González, 2022a). También se encontraron herramientas como el Índice de Resiliencia Hídrica y el modelo ARTEM-WQ, orientado a la toma de decisiones en contextos de presión por contaminantes (Delpla et al., 2014a; Mirauda et al., 2021a).

Finalmente, la herramienta computacional encontrada fue USEtox, este es un modelo computacional desarrollado por el Programa de las Naciones Unidas para el Medio Ambiente (PNUMA) y la Sociedad de Análisis del Ciclo de Vida (SETAC), orientado a la estimación de impactos toxicológicos para la salud humana y los ecosistemas derivados de la liberación de sustancias químicas al ambiente. La herramienta permite calcular factores de caracterización a partir del modelado del destino ambiental de los contaminantes, las rutas de exposición humana y la toxicidad asociada. Aunque su aplicación ha estado centrada en estudios de análisis de ciclo de vida (ACV), su estructura metodológica resulta útil para evaluar sustancias en contextos de alta carga contaminante como la minería ilegal, ya que integra datos de toxicidad y exposición de manera coherente (Belyanovskaya et al., 2019).

6.2.3.2. Caja de herramientas para el análisis de la amenaza, vulnerabilidad y/o riesgo derivado de la contaminación por metales pesados.

Se revisaron en detalle las 81 herramientas identificadas a partir de la Revisión Bibliográfica Sistemática (RBS), con el objetivo de consolidar el listado definitivo de aquellas reconocidas en los 98 estudios seleccionados sobre gestión del riesgo socioambiental asociado a la contaminación por metales pesados. Este análisis permitió precisar el propósito, el alcance y la estructura de cada herramienta, lo que facilitó la depuración del conjunto, excluyendo aquellas que resultaban redundantes, codependientes o que estaban integradas como componentes dentro de metodologías más amplias.

Como resultado de este proceso de depuración, se redujo el listado a 66 herramientas. La selección final busca representar una caja de herramientas clara, funcional y accesible para investigadores, tomadores de decisiones y actores locales interesados en estas temáticas. Cada una de las herramientas incluidas fue caracterizada en detalle, especificando su nombre, tipo, objetivo principal y referencias clave, de manera que se facilite su comprensión y aplicación en distintos contextos de análisis ambiental. La caja de herramientas consolidada se puede observar a detalle en el **Anexo 2**.

El grupo más numeroso de herramientas corresponde a índices de contaminación y riesgo, dentro del cual destacan el Índice de Geoacumulación (Igeo), el Índice de Contaminación por Metales Pesados (HPI), el Índice de Evaluación de Metales Pesados (HEI) y el Índice de Riesgo Ecológico Potencial (RI). Aunque varían en su estructura, todas comparten un enfoque centrado en cuantificar la magnitud de la contaminación o el riesgo potencial asociado. Herramientas como Igeo, CF, EF y Dc permiten establecer el nivel de acumulación de metales frente a valores de referencia, mientras que otras como RI, PERI y ERI integran factores de toxicidad o respuesta ecológica. Sin embargo, pese a su amplia adopción, la mayoría de estas herramientas operan bajo esquemas determinísticos que no consideran variabilidad espaciotemporal ni incertidumbre en la exposición, y que asumen una homogeneidad en los receptores ecológicos. Esta limitación es particularmente relevante en regiones como la cuenca del río Atrato, donde los gradientes ambientales y socioecológicos son marcados y donde los impactos acumulativos y sinérgicos entre contaminantes pueden jugar un papel crítico no considerado por estos índices. Además, muchas de estas herramientas se apoyan en valores de referencia derivados de estándares internacionales, que no siempre están armonizados con la

legislación nacional ni adaptados a las condiciones ecológicas y sociales locales, generando incertidumbres adicionales sobre su pertinencia en escenarios específicos.

En el ámbito de la evaluación de riesgo para la salud humana, se identifican herramientas más específicas como THQ, EDI, HQ, HI_{oral}, HI_{dérmico}, LADD, CR y ELCR, las cuales permiten estimar riesgos carcinogénicos y no carcinogénicos en función de dosis estimadas y factores de exposición. Si bien estas herramientas permiten una lectura más directa del impacto potencial en poblaciones humanas, su implementación sigue estando anclada en supuestos estandarizados que no necesariamente reflejan la realidad de las comunidades ribereñas expuestas a la minería ilegal. En contraste, modelos como CDI, ADD y CSF introducen elementos más cercanos a la toxicocinética, aunque siguen sin integrar condiciones sociales que modifican la vulnerabilidad, como los patrones de consumo local, la calidad de agua utilizada o la disponibilidad de atención médica. Es evidente que, desde la toxicología ambiental, los estudios han avanzado en cuantificar la exposición y estimar riesgos en condiciones ideales de laboratorio, pero aún hay un vacío importante en trasladar estos cálculos a escenarios de vulnerabilidad real, donde los factores sociales y ambientales interactúan dinámicamente.

En cuanto a los modelos conceptuales y de soporte a la toma de decisiones, herramientas como DPSIR, ABM, ARTEM-WQ, REILP y los métodos MCA-GIS destacan por su capacidad de integrar múltiples dimensiones del riesgo. Estas herramientas permiten superar la fragmentación entre amenaza y vulnerabilidad, al incorporar presiones antrópicas, respuestas institucionales y criterios de priorización territorial. Sin embargo, su uso en la literatura sigue siendo marginal frente a los índices tradicionales, lo que refleja una tendencia en la ciencia aplicada a privilegiar la medición de la carga contaminante por encima de la comprensión sistémica del riesgo. El limitado uso de estas herramientas se debe, en gran parte, a barreras técnicas como la necesidad de información cualitativa validada, costos asociados a licencias y la demanda de personal capacitado, así como a una desconexión entre la investigación académica y las necesidades de los territorios.

La diversidad de herramientas identificadas, sus enfoques y niveles de integración, evidencian la necesidad de avanzar hacia esquemas de evaluación más integrales que superen las limitaciones de los métodos convencionales centrados exclusivamente en la contaminación. Esta tesis doctoral resulta fundamental en contextos como el del río Atrato, donde los riesgos

derivados de la minería ilegal no pueden ser comprendidos ni gestionados adecuadamente sin incorporar la complejidad ecológica, económica, social, cultural e institucional del territorio.

6.2.3.3. Análisis de los aspectos socioambientales identificados

La identificación de los aspectos sociales y ambientales relevantes para el análisis de amenaza, vulnerabilidad y riesgo asociados a la contaminación por metales pesados se llevó a cabo mediante la lectura completa de los textos seleccionados en la revisión bibliográfica sistemática. Durante este proceso, se analizaron los contenidos de cada estudio para extraer, de manera directa, los elementos que los autores consideran importantes al abordar los componentes del riesgo socioambiental. El resultado fue un listado de aspectos clave que reflejan tanto condiciones del contexto como características del entorno físico y social que influyen en la amenaza y vulnerabilidad de los territorios afectados, se utilizó la Tabla 16 para consolidar esta información.

En la fase inicial del análisis, se llevó a cabo una identificación directa de aspectos socioambientales reportados en la literatura, lo que permitió consolidar un total de 435 elementos relevantes a partir de la revisión completa de los estudios científicos. Estos aspectos fueron clasificados en tres dimensiones principales: abiótica (289 aspectos), biótica (32) y socioeconómica (109), con el fin de comprender a qué componente del sistema socioambiental están vinculados. Adicionalmente, se evaluó la relación de cada aspecto con la contaminación por metales pesados en cuerpos de agua superficiales, diferenciando entre aquellos que operan como causas del fenómeno (359) y aquellos que corresponden a efectos directos o indirectos derivados de dicha contaminación (71).

Durante la revisión de los 98 artículos seleccionados en la RBS, se identificó la presencia de aspectos socioambientales recurrentes entre distintos estudios. Como resultado, se consolidó un listado definitivo a partir de 61 artículos que efectivamente contribuyeron con información relevante para esta caracterización. La Tabla 17 presenta el número de aspectos socioambientales identificados por cada artículo, evidenciando su aporte relativo a la construcción de este. El listado constituye la base para el diseño de una estructura sistémica orientada a la gestión de riesgos socioambientales asociados con la contaminación por metales pesados.

Dentro del conjunto de artículos analizados en la RBS, se destacan dos estudios realizados en Colombia como los principales aportantes al listado de aspectos socioambientales.

El primero, *"Mercury species in fish from a tropical river highly impacted by gold mining at the Colombian Pacific region"*, identificó 23 aspectos relevantes, mientras que el segundo, *"Evaluation of Mercury, Lead, Arsenic, and Cadmium in Some Species of Fish in the Atrato River Delta, Gulf of Urabá, Colombian Caribbean"*, aportó 13 aspectos. Ambos trabajos, centrados en regiones altamente vulnerables como el Chocó biogeográfico y el Golfo de Urabá, evidencian la magnitud de los impactos de la contaminación por metales pesados sobre los sistemas socioambientales, y subrayan la importancia de considerar contextos locales en el diseño de estructuras sistémicas para la gestión del riesgo.

Tabla 17. Número de aspectos socioambientales identificados por artículo

Titulo	Aspectos socioambientales identificados
Mercury species in fish from a tropical river highly impacted by gold mining at the Colombian Pacific region	23
Evaluation of Mercury, Lead, Arsenic, and Cadmium in Some Species of Fish in the Atrato River Delta, Gulf of Urabá, Colombian Caribbean	13
Effects of flushing flows on the transport of mercury-polluted particulate matter from the Flix Reservoir to the Ebro Estuary	12
Health risk assessment of the exposure of heavy metal contamination in surface water of lower Sindh, Pakistan	12
Assessing the fluvial system resilience of the river Bacchiglione to point sources of pollution in Northeast Italy: a novel Water Resilience Index (WRI) approach	11
Metal accumulations in aquatic organisms and health risks in an acid mine-affected site in South China	11
Sociocultural factors associated with fish consumption in Lake Albert fishing community: Guidelines for lead and mercury	10
A decision support system for drinking water production integrating health risks assessment	9
Chemometric analysis for pollution source identification and human health risk assessment of water resources in Ojoto Province, southeast Nigeria	9
Environmental Geochemistry and Fractionation of Cadmium Metal in Surficial Bottom Sediments and Water of the Nile River, Egypt	9
Heavy metal contamination in the complete stretch of Yamuna River: A fuzzy logic approach for comprehensive health risk assessment	9
Characteristics and assessment of toxic metal contamination in surface water and sediments near a Uranium mining area	8
Indices and models of surface water quality assessment: Review and perspectives	8
Using statistical and probabilistic methods to evaluate health risk assessment: A case study	8

Titulo	Aspectos socioambientales identificados
Assessment of dissolved mercury by diffusive gradients in thin films devices in abandoned ponds impacted by small scale gold mining	7
Analysis of water quality at hydrographic basin scale using satellite images, co-occurrence matrices and Bayes classifier	7
Evaluation of Heavy Metal Pollutants from Plateau Mines in Wetland Surface Deposits	7
Health Risk Assessment Based on Source Identification of Heavy Metal(loid)s: A Case Study of Surface Water in the Lijiang River, China	7
Human health risk assessment from heavy metals in three dominant fish species of the Ankobra river, Ghana	7
Preliminary assessment of chemical elements in sediments and larvae of <i>Gomphidae (Odonata)</i> from the Blyde river of the olifants river system, South Africa	7
Risk Assessment and Hazardous Effects of Metal Contamination in <i>O. niloticus</i> and <i>S. galilaeus</i> from Four Islands of the River Nile	7
Risk analysis of heavy metal concentration in surface waters across the rural-urban interface of the Wen-Rui Tang River, China	7
Spatial–Temporal Variations, Ecological Risk Assessment, and Source Identification of Heavy Metals in the Sediments of a Shallow Eutrophic Lake, China	7
Assessing the spatial and temporal variability and related environmental risks of toxic metals in Lake Asejire, south-western Nigeria	6
Assessment of heavy metals pollution in sediments from reservoirs of the Olt River as tool for environmental risk management	6
Assessment of the ecological and human health risks from metals in shrimp aquaculture environments in Central Java, Indonesia	6
Distribution and risk assessment of trace metals in riverine surface sediments in gold mining area	6
Distribution of Cr, Cd, Cu, Pb and Zn in organs of three selected local fish species of Turag River, Bangladesh and impact assessment on human health	6
Metal pollution and bioaccumulation in the Nhue-Day River basin, Vietnam: Potential ecological and human health risks	6
Monitoring river water and sediments within a changing Ethiopian catchment to support sustainable development	6
Potentially toxic elements contamination in surface sediment and indigenous aquatic macrophytes of the Bahmanshir River, Iran: Appraisal of phytoremediation capability	6
Risk identification of heavy metals in well water surrounds watershed area of Pangkajene, Indonesia	6

Título	Aspectos socioambientales identificados
Trace Elements in Crustaceans, Mollusks and Fish in the Kenyan Part of Lake Victoria: Bioaccumulation, Bioindication and Health Risk Analysis	6
Optimizing nature-based solutions by combining social equity, hydro-environmental performance, and economic costs through a novel Gini coefficient	5
A risk explicit interval linear programming model for uncertainty-based environmental economic optimization in the lake Fuxian watershed, China	5
Assessment of trace element toxicity in surface water of a fish breeding river in Bangladesh: a novel approach for ecological and health risk evaluation	5
Case Study of Collaborative Modeling in an Indigenous Community	5
Effects of COVID-19 era on a subtropical river basin in Bangladesh: Heavy metal(loid)s distribution, sources and probable human health risks	5
Environmental pollution indices and multivariate modeling approaches for assessing the potentially harmful elements in bottom sediments of Qaroun lake, Egypt	5
Heavy metal contamination and health risk assessment associated with abandoned barite mines in Cross River State, southeastern Nigeria	5
Metal Contents of Lake Fish in Area Close to Disposal of Industrial Waste	5
Priority Pollutants Effects on Aquatic Ecosystems Evaluated through Ecotoxicity, Impact, and Risk Assessments	5
Quantifying and predicting ecological and human health risks for binary heavy metal pollution accidents at the watershed scale using Bayesian Networks	5
Spatiotemporal distribution of environmental health risk of heavy metals in industrial wastewater of China during 1999–2018	5
Usefulness of a freshwater macrophyte (<i>Potamogeton pusillus</i>) for an environmental risk assessment in a multi-source contaminated basin.	5
Water Quality Criteria and Ecological Risk Assessment of Typical Transition Metals in South Asia	5
A systematic study on occurrence, risk estimation and health implications of heavy metals in potable water from different sources of Garhwal Himalaya, India	4
Arsenic, selenium, and metals in a commercial and vulnerable fish from southwestern Atlantic estuaries: distribution in water and tissues and public health risk assessment	4
Chemical and microbiological risk assessment of urban river water quality in Vietnam	4
Evaluating the potential health risks of heavy metal pollution in sediment and selected benthic fauna of Benin River, Southern Nigeria	4

Titulo	Aspectos socioambientales identificados
Industrial arsenic contamination causes catastrophic changes in freshwater ecosystems	4
Multiple Risk Assessment of Heavy Metals in Surface Water and Sediment in Taihu Lake, China	4
Physicochemical studies for risk identification, assessment, and characterization of artisanal barite mining in Nigeria	4
Potential health risk consequences of heavy metal concentrations in surface water, shrimp (<i>Macrobrachium macrobrachion</i>) and fish (<i>Brycinus longipinnis</i>) from Benin River, Nigeria	4
Potential human health risks from metals and As via <i>Odontesthes bonariensis</i> consumption and ecological risk assessments in a eutrophic lake	4
Assessment of the heavy metal pollution level of the river sediments in the east Donbass (Rostov region, Russia)	3
Effects of Agriculture and Animal Husbandry on Heavy Metal Contamination in the Aquatic Environment and Human Health in Huangshui River Basin	3
Identifying potentially contaminated areas with MaxEnt model for petrochemical industry in China	3
Spatial distribution of minor elements in the Tazlău river sediments: Source identification and evaluation of ecological risk	3
A collaborative serious game for water resources planning and hazard mitigation	2
Heavy metal concentrations and risk assessment of sediments and surface water of the Gan River, China	2
Probabilistic hazard assessment of contaminated sediment in rivers	2

Fuente: Elaboración propia (2025)

A partir de los 435 aspectos socioambientales inicialmente identificados en la revisión bibliográfica, se aplicó un proceso de normalización con el objetivo de unificar, depurar y estructurar el listado final. Este proceso consistió en la revisión de cada aspecto para identificar duplicidades semánticas, variaciones terminológicas que hacían referencia al mismo concepto y relaciones jerárquicas entre elementos (por ejemplo, aspectos generales que incluían otros más específicos) (Pena; Nápoles; Salgueiro, 2022). Para ello, se agruparon términos equivalentes, se redefinieron categorías cuando fue necesario y se eliminaron repeticiones o redundancias. Como resultado, se obtuvo un listado final consolidado de 58 aspectos socioambientales que refleja de manera más precisa y clara, los elementos clave para el diseño de la estructura sistémica para la gestión de riesgos derivados de la contaminación por metales pesados en cuencas hidrográficas afectadas por la minería ilegal, como la cuenca del río Atrato.

Con el fin de facilitar el análisis de los 58 aspectos socioambientales resultantes del proceso de normalización, se procedió a su clasificación en seis categorías temáticas, construidas a partir de la interpretación conceptual de cada uno de ellos. Esta agrupación permitió estructurar de manera más clara las relaciones entre cada aspecto y delimitar su alcance para el diseño de la estructura sistémica de gestión del riesgo socioambiental que se propone en el capítulo final de la tesis. La necesidad de categorizar responde a la complejidad inherente de los sistemas socioecológicos, donde múltiples dimensiones (ambientales, sociales, institucionales y físicas) interactúan y condicionan la manifestación del riesgo.

La primera categoría, *Salud ambiental y humana*, incluyó aquellos aspectos relacionados con el bienestar de las personas y la integridad de los ecosistemas, como la calidad de vida, la salud pública y la seguridad hídrica. La segunda, *Biodiversidad y ecosistemas*, agrupó los impactos sobre la fauna, la flora, la biodiversidad acuática y el equilibrio ecológico. La tercera, *Dimensiones socioculturales y calidad de vida*, integra factores sociales y culturales que afectan las dinámicas comunitarias, incluyendo la percepción del riesgo, los conflictos socioambientales y las transformaciones de las prácticas tradicionales. La cuarta categoría, *Características físicas del medio*, comprende alteraciones en componentes del medio físico como la geología, la geomorfología, los procesos hidro sedimentológicos y la morfodinámica fluvial. La quinta categoría, *Gobernanza del agua y gestión territorial*, recoge los aspectos asociados a políticas públicas, normativas, instrumentos de planificación, capacidades institucionales, capacidades de respuesta y mecanismos de articulación para la gestión del recurso hídrico y el territorio. Finalmente, la sexta categoría, *Aspectos directamente asociados a la amenaza por metales pesados*, concentra los elementos vinculados a la presencia, dispersión, bioacumulación y comportamiento ambiental de los metales pesados.

Esta clasificación facilita la identificación de interdependencias y jerarquías entre los aspectos, lo que resulta esencial para el diseño de un modelo conceptual sistémico que incorpore adecuadamente las múltiples dimensiones del riesgo derivado de la contaminación por metales pesados. En la Tabla 18 se presenta el listado de aspectos socioambientales por categoría.

Tabla 18. Aspectos socioambientales clasificados por categoría

Categoría	Aspecto Socioambiental
Salud ambiental y humana	Afectación a la calidad de vida
	Afectación a la salud del ecosistema
	Afectación a la salud humana
	Afectación a la seguridad hídrica

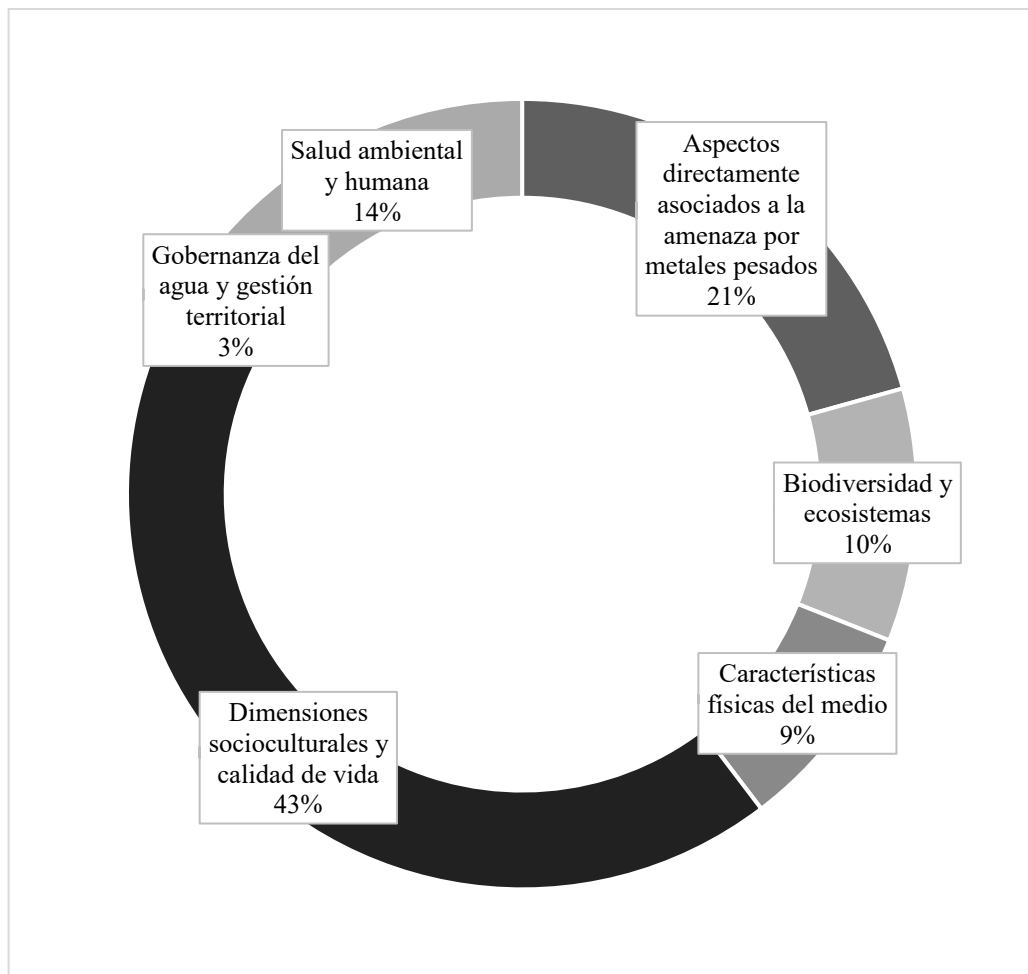
Categoría	Aspecto Socioambiental
	Presencia de actividades del sector agropecuario (Uso y ocupación del suelo)
	Presencia de actividades industriales y mineras (Uso y ocupación del suelo)
	Presencia de actividades turísticas (Uso y ocupación del suelo)
	Vulnerabilidad social y a la salud
Biodiversidad y ecosistemas	Afectación a la biodiversidad acuática por contaminación
	Afectación a la fauna y flora aledaña
	Afectación de la seguridad del ecosistema
	Alteración del equilibrio ecológico
	Degradación Ambiental de Ecosistemas y Hábitats Acuáticos
	Degradación Ambiental de Ecosistemas y Hábitats terrestres
Dimensiones socioculturales y calidad de vida	Afectación de dimensiones socioculturales
	Calidad del agua inadecuada
	Cambio en el uso del suelo
	Cambio en los procesos geoquímicos
	Compactación del suelo
	Deforestación
	Descarga de aguas industriales, mineras, agrícolas y domésticas
	Disminución de la capacidad de resiliencia de los ríos
	Emisiones de contaminantes atmosféricos
	Inclusión del comportamiento climático de la región
	Limitación en el uso recreativo del río
	Limitaciones en la navegabilidad del río
	Localización cercana a fuentes hídricas contaminadas
	Ocupación irregular del entorno de las áreas preservadas
	Prácticas agrícolas insostenibles
	Presencia de áreas ambientales protegidas
	Presencia de pasivos ambientales mineros
	Presencia de rellenos sanitarios o sitios de disposición final de residuos sólidos
	Presión antrópica por crecimiento poblacional y migración
	Proliferación de cianobacterias
	Re-movilización de contaminantes en los sistemas acuáticos
	Salinización del agua y suelo
	Saneamiento ambiental inadecuado
	Uso inadecuado de los recursos hídricos
	Vulnerabilidad por condiciones socioeconómicas y de acceso

Categoría	Aspecto Socioambiental
Características físicas del medio	Alteración de las condiciones geológicas, topográficas y geomorfológicas
	Alteración de las condiciones hidrogeológicas
	Alteración geomorfológica del cauce
	Erosión
Gobernanza del agua y gestión territorial	Movilización de metales pesados por inundación
	Ausencia de políticas públicas y directrices para el consumo de pescado
Aspectos directamente asociados a la amenaza por metales pesados	Débil fiscalización de normas y políticas ambientales
	Bioacumulación y biomagnificación de metales pesados en la cadena trófica acuática y terrestre
	Biodisponibilidad de metales pesados
	Contaminación de residuos sólidos peligrosos y/o tóxicos
	Contaminación del agua por metales pesados
	Contaminación del suelo y sedimentos por metales pesados
	Deposición atmosférica de metales pesados
	Existencia de fuente de contaminación difusa
	Exposición humana a metales pesados por ingesta de alimentos o agua
	Movilización de metales pesados por acidez en suelos y aguas
	Movilización de metales pesados por escorrentía
	Pérdida de cosechas por metales pesados
	Persistencia de metales pesados en el ambiente

Fuente: Elaboración propia (2025)

La Figura 10 muestra la distribución de los aspectos socioambientales por categoría, permitiendo evidenciar que la categoría *Dimensiones socioculturales y calidad de vida* agrupa el mayor número de elementos, reflejando la centralidad que tienen los factores sociales, culturales y comunitarios en la configuración del riesgo socioambiental. Esta prevalencia responde al reconocimiento de que las dinámicas sociales no solo influyen en la percepción y respuesta frente a la contaminación, sino que también determinan los niveles de amenaza y vulnerabilidad que enfrentan las comunidades. Si bien en la RBS se identificaron menos estudios que adoptan esta perspectiva, aquellos que lo hacen integran una diversidad de aspectos de forma heterogénea, lo que complejiza su aplicación y demanda una mayor cantidad y calidad de información (Mestanza-Ramón et al., 2022).

Figura 10. Distribución porcentual de aspectos socioambientales por categoría



Fuente: Elaboración propia (2025)

En contraste, la categoría *Aspectos directamente asociados a la amenaza por metales pesados* contiene un menor número de aspectos, lo cual no implica una menor importancia dentro del análisis del riesgo. Por el contrario, esta categoría representa el eje central del factor amenaza, al incluir elementos como la presencia, movilidad, biodisponibilidad y bioacumulación de metales pesados en los distintos medios ambientales. Su menor representación responde al hecho de que esta amenaza se analiza de forma específica y estandarizada, a través de la comparación entre mediciones realizadas en campo y valores de referencia definidos por normativas ambientales. En función de esta comparación se determina la presencia de amenaza y su grado, lo que genera una caracterización más uniforme.

Este contraste evidencia una limitación estructural en el análisis del riesgo socioambiental: mientras la amenaza por contaminación dispone de protocolos estandarizados

y herramientas consolidadas, las dimensiones social, institucional y territorial carecen de metodologías sistemáticas que permitan una caracterización rigurosa (Valencio; Valencio, 2017). Esta diferencia refuerza la necesidad de avanzar en el desarrollo de herramientas integradoras que aborden la complejidad multidimensional del riesgo y contribuyan a una gestión más integral y equitativa en cuencas hidrográficas contaminadas con metales pesados.

6.3. CONSIDERACIONES FINALES

La Revisión Bibliográfica Sistemática permitió identificar un conjunto diverso de herramientas e indicadores utilizados para evaluar el riesgo socioambiental derivado de la contaminación por metales pesados. Se constató un uso dominante de índices cuantitativos centrados en la caracterización de la amenaza, con énfasis en la medición de concentraciones y toxicidad. Sin embargo, este enfoque deja de lado elementos críticos relacionados con la vulnerabilidad de los territorios, lo que limita su utilidad en contextos de alta complejidad social y ecológica, como la cuenca del río Atrato y particularmente el río Quito, estudio de caso que será analizado en esta tesis.

En cuanto a la identificación de herramientas para la determinación de la amenaza, vulnerabilidad y riesgo, se evidenció una escasa disponibilidad de enfoques metodológicos aplicables a las dimensiones sociales, institucionales y territoriales, lo que dificulta su adecuada integración en el análisis del riesgo. La evidencia recogida muestra que las metodologías existentes raramente abordan factores como la gobernanza del agua, la resiliencia comunitaria o las limitaciones en el acceso a servicios básicos, elementos fundamentales para comprender la exposición diferenciada y la capacidad de respuesta frente a la contaminación. Considerando que la vulnerabilidad está directamente relacionada con la capacidad de adaptación, la sensibilidad y la exposición. Este hallazgo refuerza la necesidad de avanzar hacia enfoques de evaluación que reconozcan la multidimensionalidad del riesgo, haciendo más operativa, viable y eficiente su gestión.

La Revisión Bibliográfica Sistemática permitió seleccionar un total de 98 artículos científicos que cumplieron con los criterios de pertinencia y profundidad definidos para esta investigación. A partir de su análisis, se identificaron 81 herramientas utilizadas para la evaluación de la amenaza, vulnerabilidad y riesgo socioambiental asociados a la contaminación por metales pesados. Tras un proceso de depuración, se consolidó una caja de herramientas

compuesta por 66 de las inicialmente identificadas, las cuales fueron descritas de acuerdo con su tipo, propósito y aplicabilidad.

La sistematización de 58 aspectos socioambientales, clasificados en seis categorías temáticas, aportó una base conceptual robusta para el diseño de una estructura sistémica que funcione como modelo conceptual para la gestión del riesgo derivado de la contaminación por metales pesados. Estas categorías permitieron establecer relaciones jerárquicas y funcionales entre los componentes del sistema socio ecológico y constituyen un insumo clave para el desarrollo de instrumentos de gestión más apropiados y contextualizados con las cuencas afectadas por la minería ilegal, como la del río Quito, se busca que estos instrumentos trasciendan de la cuantificación del contaminante y permitan abordar el riesgo como resultado de interacciones complejas entre variables biofísicas y sociales.

A partir de estos hallazgos, se propone consolidar una estructura sistémica que articule los factores identificados con el conocimiento contextual de la cuenca del río Quito. Este modelo buscará servir como herramienta orientadora para la toma de decisiones, promoviendo estrategias de gestión del riesgo más coherentes con las realidades territoriales. La tesis avanza así hacia un enfoque operativo que permita superar las limitaciones de las herramientas tradicionales, facilitando intervenciones eficaces en escenarios de contaminación por metales pesados. Este capítulo corresponde al capítulo 4 de la tesis doctoral, donde a partir de la caracterización de los factores que inciden en la amenaza y vulnerabilidad socioambiental asociada a la contaminación por metales pesados en la cuenca del río Quito (subcuenca del río Atrato), se planteará una estructura sistémica, a partir del conocimiento específico de este caso.

7. CAPÍTULO 3. FACTORES QUE INCIDEN EN LA AMENAZA Y VULNERABILIDAD SOCIOAMBIENTAL ASOCIADA A LA CONTAMINACIÓN POR METALES PESADOS EN LA CUENCA DEL RÍO QUITO.

Considerando los conceptos de amenaza, vulnerabilidad y riesgo, previamente definidos a partir de la revisión narrativa, se planteó analizar los factores que inciden en la amenaza y vulnerabilidad socioambiental asociada a la contaminación por metales pesados, específicamente en la subcuenca del río Quito, una de las subcuencas más afectas por la minería ilegal de oro de la cuenca del río Atrato, departamento del Chocó.

Un factor es un elemento que juega un rol determinante en un resultado, es decir, que resulta influyente en algún aspecto de la realidad, y que por lo tanto debe ser tomado en cuenta

a la hora de estudiarla(Coria, 2008; Ordóñez, 2000). Por tal motivo, para el planteamiento de la estructura sistémica para la gestión del riesgo, se hace necesario caracterizar aquellos factores que inciden en la amenaza de contaminación por metales pesados y la vulnerabilidad socioambiental de la cuenca del río Quito ante dicha amenaza. El objetivo del presente capítulo fue analizar los factores que inciden en la amenaza y vulnerabilidad socioambiental asociada a la contaminación por metales pesados en la cuenca del río Quito.

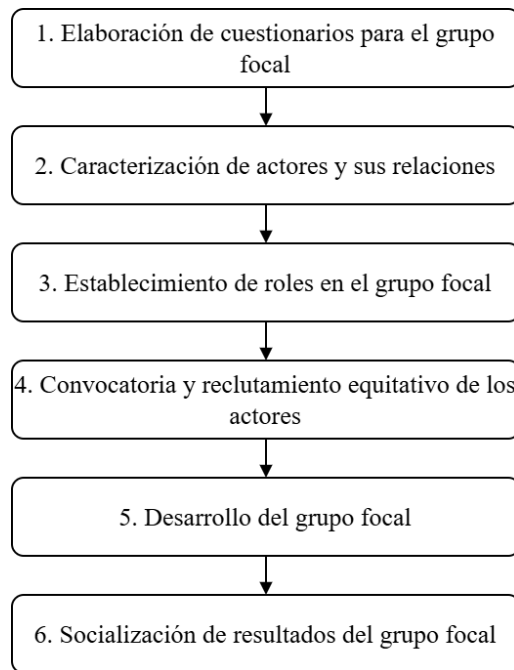
7.1. PROCECIMIENTOS METODOLÓGICOS

7.1.1. Identificación de factores asociados a la amenaza y vulnerabilidad

Los grupos focales promueven la interacción y sinergia entre los actores, por tanto, en cuanto a investigación cualitativa, se consideran una técnica apropiada para la recolección de datos de alta calidad, donde, un moderador dirige entrevistas colectivas formuladas con preguntas abiertas con el fin de obtener el mayor número de argumentos y perspectivas sobre un tema, en un tiempo limitado (Tümen Akyildiz; Ahmed, 2021). En este sentido, con la finalidad de identificar los factores asociados a la amenaza de contaminación por metales pesados en la cuenca del río Quito, así como los factores que determinan la vulnerabilidad socioambiental ante esa amenaza, se llevó a cabo un grupo focal con actores de la cuenca. La información recopilada en el grupo focal fue analizada y procesada posteriormente para generar una lista de factores en cada caso, los cuales se validaron mediante la revisión de literatura sobre estas temáticas.

El procedimiento para la realización del grupo focal puede observarse en el siguiente flujograma.

Figura 11. Procedimiento Grupo focal



Fuente: Elaboración propia (2025)

7.1.2. Caracterización de factores asociados a la amenaza y vulnerabilidad

Una vez identificados los factores asociados a la amenaza de contaminación por metales pesados en la cuenca del río Quito y la vulnerabilidad socioambiental asociada a esta amenaza, se realizó una investigación documental con el fin de establecer una línea base sobre estos factores; para el caso de la vulnerabilidad, los factores se estudiaron a partir de la información establecida en los subsistemas del Sistema de Información Ambiental de Colombia y se construyeron los mapas temáticos utilizando el software ArcGIS Pro. Para el caso de la amenaza de contaminación por metales pesados se definió un plan de muestreo ambiental, que consistió en determinar sitios de interés de acuerdo con el uso y ocupación del suelo en la cuenca del río Quito, en este sentido se definieron 65 puntos de muestreo para la matriz agua superficial y sedimentos, entre los cuales 35 puntos se ubicaron en el cauce principal del río Quito, 1 punto en el río Atrato donde desemboca el río Quito y los otros 28 puntos distribuidos entre los diferentes arroyos, quebradas y ríos que tributan al río Quito, donde también se evidencian impactos de la minería ilegal de oro.

El muestreo ambiental se llevó a cabo entre los meses de noviembre y diciembre del año 2021. Tal como se explicó en el capítulo de introducción al contexto territorial, el Chocó Biogeográfico es una de las regiones del mundo con mayores precipitaciones registradas, según el IDEAM las precipitaciones mensuales pueden llegar hasta los 550 milímetros, siendo de

carácter monomodal con lluvias más intensas entre el segundo y cuarto trimestre del año (ORGANIZACIÓN DE LAS NACIONES UNIDAS PARA LA ALIMENTACIÓN Y LA AGRICULTURA (FAO), 2022). La época de precipitaciones más bajas inicia en el mes de diciembre y finaliza en el mes de marzo, aun así, en esta época las precipitaciones mensuales no son inferiores a los 300 milímetros al mes. Se concluye que esta región es una de las más lluviosas del mundo, aspecto que por supuesto condiciona la dispersión de los contaminantes en la cuenca hidrográfica, mediante la escorrentía e infiltración (ORGANIZACIÓN DE LAS NACIONES UNIDAS PARA LA ALIMENTACIÓN Y LA AGRICULTURA (FAO), 2022).

El muestreo de agua superficial incluyó la medición de parámetros fisicoquímicos como pH, ORP, conductividad, turbidez y sólidos disueltos totales, utilizando un multiparámetro Hanna HI 9829 (Woonsocket, Rhode Island, Estados Unidos), conforme a los métodos normalizados para el análisis de agua y aguas residuales de la Asociación Americana de Salud Pública (American Public Health Association, 2022). Las muestras de agua fueron recolectadas puntualmente a una profundidad aproximada de 0,30 m en la columna de agua y almacenadas en recipientes de polipropileno de 250 mL, previamente rotulados. Para su preservación, se acidificaron con ácido nítrico hasta alcanzar un pH de 1 y se mantuvieron en refrigeración. Los análisis fueron realizados en un laboratorio internacional debidamente acreditado, donde se determinaron los niveles de metales tóxicos, incluyendo arsénico (As), cobre (Cu), plomo (Pb), zinc (Zn), cadmio (Cd), níquel (Ni), cromo (Cr) y mercurio (Hg). Estos fueron analizados mediante espectrometría de masas con plasma acoplado inductivamente (ICP-MS) en un Perkin Elmer Sciex ELAN 9000 ICP/MS, previa digestión ácida asistida por microondas, siguiendo el método EPA 3015A (2007) (EPA, 2007).

Los análisis geoquímicos de las muestras de sedimentos incluyen los siguientes códigos, en los cuales se define el límite de detección: *UltraTrace 2 Agua Regia Digestion (ICP-OES+ICP-MS finish)*, *1C-Research Fire Assay (ICP-MS finish for PGE)*, *1G Hg by FIMS (sediments)* y *UltraTrace 3 4-Acid Digestion, INAA+ICP-OES+ICP-MS finish*. Un resumen de dichas metodologías se cita en las Los resultados mostraron valores dentro de las especificaciones de los materiales de referencia certificados utilizados con porcentajes de recuperación entre el 90 y 110% (Fondo Colombia en Paz; Universidad de Córdoba; Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible, 2023).

Tabla 19, Tabla 20 y Tabla 21. Los resultados mostraron valores dentro de las especificaciones de los materiales de referencia certificados utilizados con porcentajes de

recuperación entre el 90 y 110% (Fondo Colombia en Paz; Universidad de Córdoba; Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible, 2023).

Tabla 19. Metodología de análisis – Código Ultratrace 2

Ultratrace 2: Digestión parcial con Agua Regia: En esta digestión se utiliza una combinación de HCl y HNO ₃ concentrados para lixiviar sulfuros, algunos óxidos y algunos silicatos. Las fases minerales que apenas son atacadas (si es que están presentes) son la barita, el circón, la monacita, la esfena, la cromita, la ganita, el granate, la ilmenita, el rutilo y la casiterita. El resto de los silicatos y óxidos son atacados de forma leve a moderada, dependiendo del grado de alteración.			
Elemento	Unidad	Límite de detección	Método de análisis*
Aluminio (Al)	%	0,01	AR-MS
Vanadio (V)	ppm	1,00	AR-MS
Cromo (Cr)	ppm	1,00	AR-MS
Manganeso (Mn)	ppm	1,00	AR-MS
Hierro (Fe)	%	0,01	AR-MS
Cobalto (Co)	ppm	0,10	AR-MS
Níquel (Ni)	ppm	0,10	AR-MS
Cobre (Cu)	ppm	0,20	AR-MS
Zinc (Zn)	ppm	0,10	AR-MS
Arsénico (As)	ppm	0,10	AR-MS
Selenio (Se)	ppm	0,10	AR-MS
Plata (Ag)	ppm	0,002	AR-MS
Cadmio (Cd)	ppm	0,01	AR-MS
Oro (Au)	ppb	0,50	AR-MS
Plomo (Pb)	ppm	0,10	AR-MS
Mercurio (Hg)	ppb	10,00	AR-MS

Nota: *AR-MS: digestión con Agua Regia y cuantificación por espectrometría de masas con plasma acoplado inductivamente (ICP-MS) y AR-ICP: digestión con Agua Regia y cuantificación por espectrometría óptica con plasma acoplado inductivamente (ICP-OES).

Fuente: (Fondo Colombia en Paz; Universidad de Córdoba; Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible, 2023)

Tabla 20. Metodología de análisis – Código Ultratrace 3

Ultratrace 3: Digestión con 4 ácidos: En esta digestión se utiliza una combinación de HCl, HF, HClO ₄ y HNO ₃ concentrados. Con esta digestión algunas fases pueden ser solubilizadas sólo parcialmente. Estas fases incluyen el circón, la monacita, la esfena, la ganita, la cromita, la casiterita, el rutilo y la barita.			
Elemento	Unidad	Límite de detección	Método de análisis*
Oro (Au)	ppb	2,00	INAA
Plata (Ag)	ppm	0,05	MULT INAA/TD-ICP/TD-MS
Cobre (Cu)	ppm	0,20	MULT TD-ICP/TD-ICP-MS
Cadmio (Cd)	ppm	0,10	MULT TD-ICP/TD-ICP-MS
Plomo (Pb)	ppm	0,50	MULT TD-ICP/TD-ICP-MS

Níquel (Ni)	ppm	0,50	MULT INAA/TD-ICP/TD-MS
Zinc (Zn)	ppm	0,50	MULT INAA/TD-ICP/TD-MS
Aluminio (Al)	%	0,01	TD-ICP
Arsénico (As)	ppm	0,50	INAA
Cobalto (Co)	ppm	0,10	MULT INAA/TD-ICP-MS
Cromo (Cr)	ppm	1,00	MULT INAA/TD-ICP-MS
Hierro (Fe)	%	0,01	INAA
Mercurio (Hg)	ppm	1,00	INAA
Manganeso (Mn)	ppm	1,00	TD-ICP

Nota: *TD-MS: digestión con 4 ácido y cuantificación por espectrometría de masas con plasma acoplado inductivamente (ICP-MS), TD-ICP: digestión con 4-ácido y cuantificación por espectrometría óptica con plasma acoplado inductivamente (ICP-OES) e INAA: Análisis por activación neutrónica.

Fuente: (Fondo Colombia en Paz; Universidad de Córdoba; Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible, 2023)

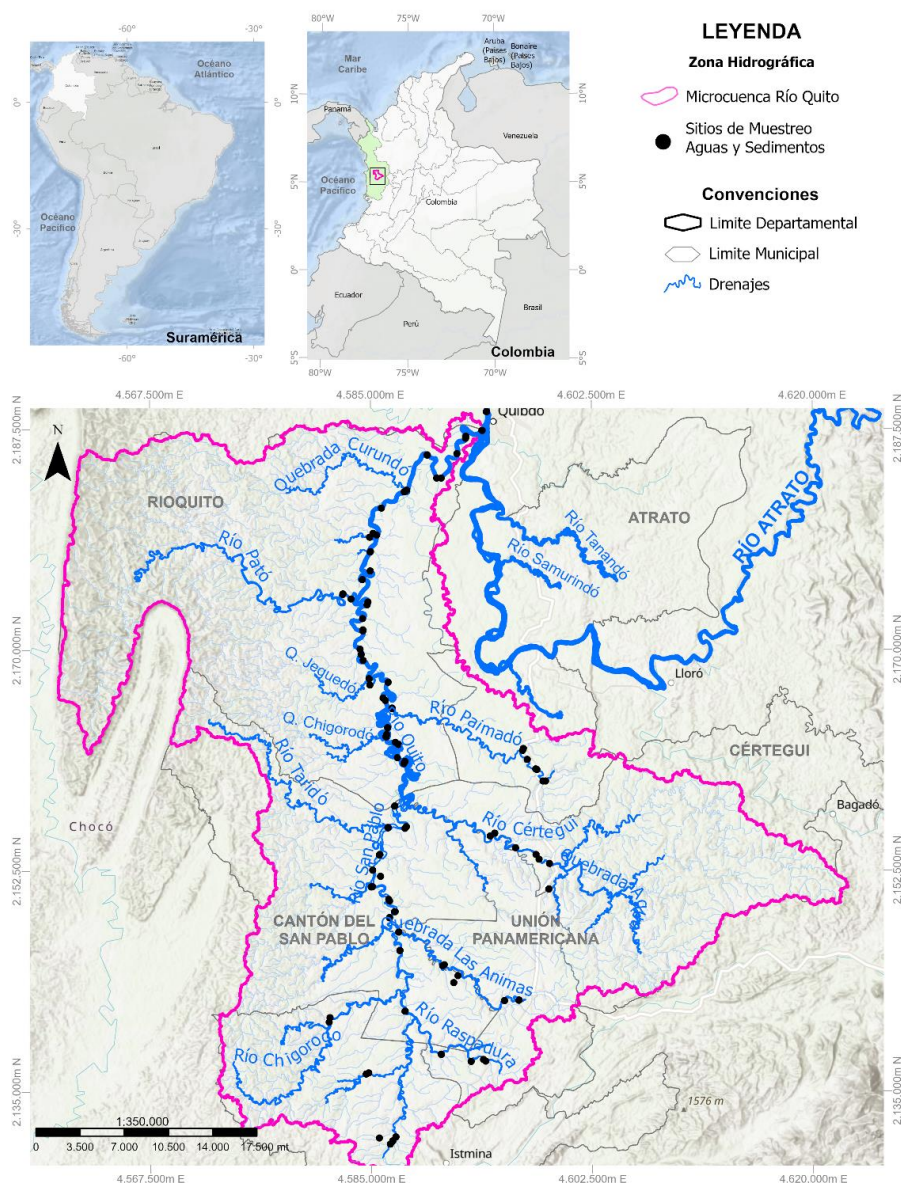
Tabla 21. Metodologías de análisis para metales preciosos y mercurio

Elemento	Unidad	Límite de detección	Método de análisis
Oro (Au)	ppb	1,00	Ensayo al Fuego / FA-MS
Mercurio (Hg)	ppb	5,00	Agua Regia - Vapor Frío Hg FIMS_ 1G

Fuente: (Fondo Colombia en Paz; Universidad de Córdoba; Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible, 2023)

Para el muestreo de sedimentos, se recolectaron tres muestras puntuales en cada orilla y en el centro del cauce, siguiendo la sección transversal definida para el punto de muestreo. Se analizaron parámetros físicos, como textura y tamaño de grano, así como la concentración de metales potencialmente tóxicos (As, Cu, Pb, Zn, Cd, Ni, Cr y Hg). Estos análisis se realizaron mediante ICP-MS en un Perkin Elmer Sciex ELAN 9000 ICP/MS, previa digestión ácida asistida por microondas, conforme al método EPA 3051A (2007)(EPA, 2007). A continuación, se presentan los mapas de puntos de muestreo en agua superficial y sedimentos para la cuenca del río Quito durante el mes de noviembre del año 2021.

Mapa 3. Sitios de muestreo en agua superficial y sedimentos



Fuente: Elaboración propia (2025)

7.1.3. Interpretación de resultados de la caracterización de factores asociados a la amenaza y vulnerabilidad.

Con el fin de analizar los resultados de la caracterización de los factores se implementaron diferentes técnicas. Para los factores asociados a la vulnerabilidad, se utilizó la herramienta ArcGis Pro con la finalidad de representar el comportamiento y distribución espacial de esos factores que predisponen tanto física como socialmente a la subcuenca del río Quito ante la amenaza de contaminación por metales pesados. Por su parte, para los factores

asociados a la amenaza se utilizaron tres índices encontrados en la revisión de la literatura, con el fin de establecer niveles de contaminación a partir de los resultados del muestreo ambiental; los índices utilizados fueron: índice de contaminación por minería (ICOMINERA) para la matriz agua superficial e índice de geoacumulación (Igeo) para la matriz sedimentos. A continuación, se detalla el procedimiento para el cálculo de estos índices.

7.1.3.1. Índice de contaminación por minería (ICOMINERA)

Restrepo-Valencia (2015), formuló un índice que permite medir la contaminación de la minería aurífera aluvial sobre el río Cabí, departamento del Chocó. Las variables seleccionadas fueron: turbiedad, sólidos suspendidos totales y mercurio. El Hg es un indicador directo del impacto de la minería aurífera aluvial en zonas donde no se encuentra este elemento de forma natural (Restrepo-Valencia, 2015). El índice se expresa con la siguiente ecuación (1):

$$ICOMINERA = \frac{1}{3} (I_{Turbiedad} + I_{Sólidos\ suspendidos\ totales} + I_{Mercurio}) \quad (1)$$

Donde:

$$I_{Turbiedad} = 0,174 * e^{0,0163 * X} \quad (2)$$

I_{Turbiedad}: es la función la curva del subíndice de turbiedad calculada por Restrepo-Valencia (2015)

X= valor asociado a la turbiedad en Unidades Nefelométricas de Turbidez (NTU)

Si la turbiedad > 100 NTU, entonces $I_{Turbiedad} = 1$

Si la turbiedad < 0 NTU, entonces $I_{Turbiedad} = 0$

$$I_{Sólidos\ suspendidos\ totales} = -0,02 + 0,003 * X(Sólidos\ suspendidos\ totales\ (Mg/L)) \quad (3)$$

I (Sólidos suspendidos totales): se obtuvo de la función del subíndice de sólidos suspendidos totales, de acuerdo con Restrepo-Valencia (2015).

Si sólidos suspendidos > 340 mg/L, entonces $I_{Sólidos\ suspendidos\ totales} = 1$

Si sólidos suspendidos < 10 mg/L, entonces $I_{Sólidos\ suspendidos\ totales} = 0$

$$I_{Mercurio} = 0,003648X^2 + 0,0589 * X + 0,0443 \quad (4)$$

$I_{Mercurio}$: se obtuvo de la función que describe la curva del subíndice de contaminación en función de la concentración de Hg, de acuerdo con Restrepo-Valencia (2015).

X: concentración del Hg en $\mu\text{g/L}$

La siguiente tabla muestra la interpretación cualitativa de los rangos determinados por el ICOMINERA.

Tabla 22. Interpretación de rangos del ICOMINERA

Valor del índice	Valoración cualitativa
0 – 0,2	No hay contaminación
0,21 – 0,4	Contaminación leve
0,41 – 0,6	Contaminación media
0,61 – 0,8	Contaminación alta
0,81 – 1	Contaminación muy alta

Fuente: Restrepo Valencia (2015)

7.1.3.2. Índice de geoacumulación (I_{geo})

Müller definió originalmente un índice de geo-acumulación (I_{geo}) en 1969 con el fin de determinar y definir la contaminación por metales en los sedimentos, comparando las concentraciones actuales con los niveles preindustriales (Muller, 1969; Qingjie et al., 2008)

Se puede calcular mediante la Ecuación 5:

$$I_{geo} = \log_2 \left[\frac{C_n}{1,5 GB} \right] \quad (5)$$

Donde C_n es el valor de concentración del metal n en el suelo y GB es el valor de referencia de fondo en la corteza terrestre para el metal n . El factor 1,5 se usa para minimizar el efecto de posibles cambios en los valores de fondo litogénicos en el suelo (Baltas et al., 2020). Varios estudios geoquímicos han contribuido a la creación de una amplia base de datos de valores de fondo de metales pesados (UCC, NASC) que ahora puede utilizarse para evaluar la calidad del medio ambiente en caso de no contar con los datos específicos del *Background* de la zona.

La geo-acumulación definida por el índice fue distinguida en siete clases por Müller: $I_{geo} \leq 0$, clase 0, impoluto; $0 < I_{geo} \leq 1$, clase 1, de no contaminado a moderadamente contaminado; $1 < I_{geo} \leq 2$, clase 2, moderadamente contaminado; $2 < I_{geo} \leq 3$, clase 3, de moderadamente a fuertemente contaminado; $3 < I_{geo} \leq 4$, clase 4, muy contaminado; $4 < I_{geo} \leq 5$, clase 5, de muy contaminado a extremadamente contaminado; e $I_{geo} > 5$, clase 6, extremadamente contaminado, como se muestra en la siguiente tabla.

Tabla 23. Calidad del suelo según los valores del Índice de Geo-acumulación

Clases	Valores de I_{geo}	Calidad del suelo
0	$I_{geo} \leq 0$	No contaminado (impoluto)
1	0-1	No contaminado a moderadamente contaminado
2	1-2	Moderadamente contaminado
3	2-3	Moderadamente a muy (fuertemente) contaminado
4	3-4	Muy contaminado
5	4-5	Muy contaminado a extremadamente contaminado
6	5-6	Extremadamente contaminado

Fuente: Muller (1969)

7.2.RESULTADOS Y DISCUSIONES

7.2.1. Factores asociados a la amenaza y vulnerabilidad

El grupo focal realizado tuvo como objetivo identificar los factores asociados a la amenaza de contaminación por metales pesados, así como, los factores relacionados con la vulnerabilidad de la subcuenca del río Quito y sus comunidades ante esta contaminación potencial. Este grupo focal fue liderado por el autor de esta tesis doctoral en conjunto con un equipo técnico del convenio 705 de 2021 de la Universidad de Córdoba, un equipo de WWF Colombia y especialmente por el señor Bernardino Mosquera, guardián de río Atrato, quien indicó a manera de introducción que “*la minería ilegal afecta en todo sentido los ecosistemas, no hay árboles. Se están secando las fuentes hídricas, está contaminando por mercurio y el calentamiento global*” dando contexto y relevancia al debate, con la intención de incentivar un espacio propositivo para el fortalecimiento de la gobernanza ambiental.

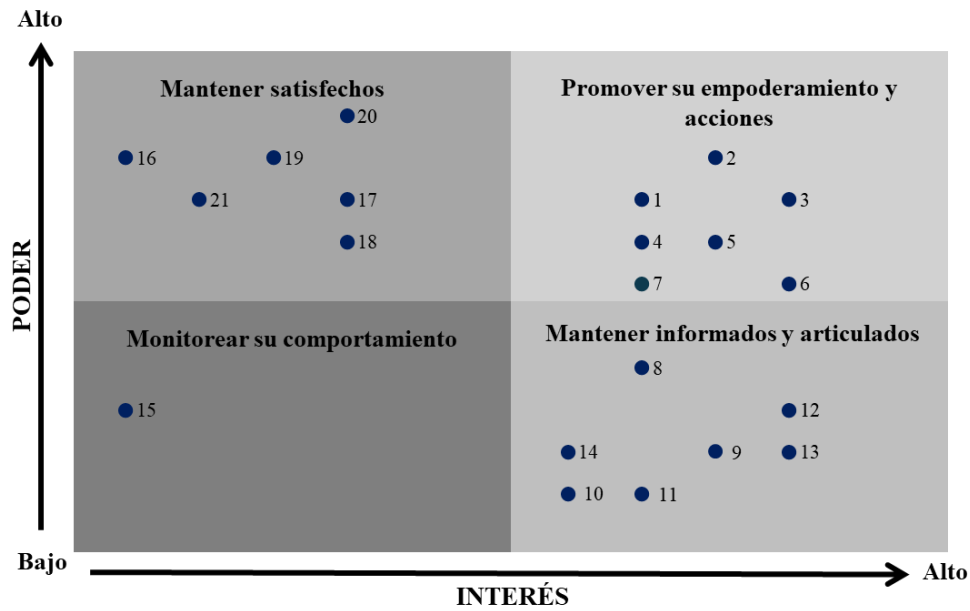
El grupo focal fue realizado al finalizar y socializar todo el ejercicio y monitoreo sobre la contaminación por metales pesados en la cuenca, con el fin de avanzar en la propuesta de la estructura sistémica para la gestión de riesgos socioambientales a partir de la identificación de los factores asociados a la amenaza y vulnerabilidad en el territorio. No obstante, es

fundamental dejar constancia de los múltiples espacios de participación llevados a cabo en el marco de la ejecución del convenio 705 de 2021, los cuales iniciaron con socializaciones previas de las actividades, planificación conjunta de la logística de muestreo y definición de sitios, socializaciones parciales de resultados, talleres teórico-prácticos para el fortalecimiento de capacidades de las comunidades afro e indígenas en monitoreo ambiental, entre otros, que permitieron construir una sólida relación entre la Universidad de Córdoba como principal ejecutora del convenio 705 de 2021 y las comunidades de la cuenca del río Quito. Todos estos antecedentes de colaboración y reconocimiento fueron recopilados mediante el grupo focal propuesto en la metodología de esta tesis doctoral, con la finalidad de identificar los factores socioambientales relacionados con la amenaza y la vulnerabilidad en esta cuenca (Universidad de Córdoba; Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible; Fondo Colombia en Paz, 2023).

En el marco del desarrollo del grupo focal se aplicó un cuestionario que indagó a los actores participantes sobre las causas y consecuencias de la contaminación por metales pesados, los mecanismos de respuesta con los que cuentan y las condiciones físicas que predisponen a la región ante la existencia potencial de esa contaminación. Durante el grupo focal se reconoció por parte de los asistentes y el moderador, que existen actores asociados a la amenaza y vulnerabilidad de la cuenca hidrográfica del río Quito que no asistieron al espacio, por ejemplo, los grupos armados al margen de la ley, representantes de los mineros que desarrollan actividades ilegales, entre otros, por lo tanto se propuso establecer una identificación y caracterización de todos los actores involucrados en la gestión de riesgos socioambientales, la cual se desarrolló mediante una matriz de análisis de actores que establece su posicionamiento frente a la problemática central de la discusión (Kennon; Howden; Hartley, 2009).

La Figura 12 muestra de manera jerárquica el resultado del análisis de los actores identificados por los asistentes.

Figura 12. Caracterización y análisis de actores



Actores	
1. Gobernación del Chocó	12. Miembros de los consejos comunitarios Foro interétnico Miembros de los resguardos y cabildos indígenas
2. Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible	13. Organizaciones de Base Comunitaria, asociaciones y/o Juntas de Acción Comunal
3. Directivos de los Consejos Comunitarios Afro Autoridades de los resguardos y cabildos indígenas	14. Fundaciones y empresas de consultoría
4. Alcaldías	15. Trabajadores de dragas de minería
5. Codechocó (autoridad ambiental de la región)	16. Grupos armados al margen de la ley
6. Cuerpo Colegiado de Guardianes del río Atrato Secretaría técnica de Guardianes del río Atrato (Líderes sociales de la Sentencia T-622 de 2016).	17. Autoridad Nacional de Licencias Ambientales (Autoridad ambiental de la Nación)
7. Defensoría del Pueblo Mesa Indígena del Chocó	18. Autoridad Nacional de Acuicultura y Pesca
8. Instituto de Investigaciones Ambientales del Pacífico	19. Policía de Colombia Ejército de Colombia
9. Universidad Tecnológica del Chocó Diego Luis Córdoba Universidad de Córdoba	20. Corte constitucional de Colombia
10. Cruz Roja	21. Empresas del sector minero
11. ONGs Red de Jóvenes de Ambiente (Voluntariado)	

Fuente: Elaboración propia (2025)

La matriz de actores constituye una herramienta clave para analizar el posicionamiento y los argumentos que cada actor emplea frente a una problemática específica. En este estudio, su aplicación permitió identificar que ciertos actores, como los grupos armados al margen de la ley, los mineros ilegales que operan en dragas, las empresas del sector minero, la Autoridad Nacional de Licencias Ambientales (ANLA), la Autoridad Nacional de Acuicultura y Pesca (AUNAP), la Corte Constitucional, la Policía y el Ejército Nacional, presentan un bajo interés en abordar las problemáticas asociadas a la minería ilegal en la cuenca del río Atrato. Esta falta

de compromiso responde principalmente a dos factores: por un lado, la oposición de actores como los grupos armados y los mineros ilegales a las soluciones propuestas; por otro, las limitaciones institucionales que enfrentan algunas entidades, las cuales restringen su capacidad para implementar acciones directas de mitigación.

Por otro lado, la matriz evidencia el rol central de los líderes comunitarios en la promoción de la gobernanza y la justicia ambiental en la región. En particular, resalta la labor de la comisión de Guardianes del río Atrato, establecida mediante la Sentencia T-622 de 2016, quienes actúan como garantes de la ejecución de planes de acción orientados a la protección, recuperación y conservación del río. El análisis también muestra que la mayoría de los actores involucrados manifiestan un alto interés en atender los factores que intensifican la amenaza y la vulnerabilidad en la cuenca del río Quito, con el propósito de diseñar e implementar estrategias eficaces para mitigar las problemáticas identificadas, por tanto se demuestra un interés colectivo en la búsqueda de soluciones para los impactos negativos generados por la minería ilegal.

Las preguntas de contexto aplicadas inicialmente y la identificación de otros actores ausentes del grupo focal, pero cuyo rol es fundamental en la discusión de estas temáticas, sirvieron para despertar el interés y generar expectativa por la actividad planteada. Los resultados de la identificación de los factores asociados a la amenaza y vulnerabilidad mediante el grupo focal se presentan en las siguientes tablas.

Tabla 24. Factores directos e indirectos asociados a la amenaza de contaminación del río Quito por metales pesados

Amenaza	Factores directos	Factores indirectos
Presencia de metales pesados en el agua superficial y sedimentos del río Quito	• Concentración de metales pesados en el agua superficial • Concentración de metales pesados en los sedimentos	• Vertimientos puntuales o difusos de residuos de la minería ilegal
Deposición de metales pesados en zonas de cultivo debido a desbordamientos o alteraciones hidráulicas del río Quito	• Comportamiento hidráulico del río Quito	• Zonas en riesgo por inundación

Presencia de minería aluvial Ilegal en la cuenca del río Quito	• Área afectada por minería ilegal en la cuenca	• Presencia de bancos de arena
--	---	--

Fuente: Elaboración propia (2025)

Tabla 25. Factores directos e indirectos asociados a la vulnerabilidad socioambiental de la cuenca ante la contaminación por metales pesados

Vulnerabilidad	Factores directos	Factores indirectos
Vulnerabilidad ante la afectación del ecosistema por la contaminación con metales pesados	• Uso y cobertura de la tierra • Características de la edafología • Red hídrica de la cuenca	• Características de la geología y la geomorfología
	• Zonas de importancia ecológica • Servicios ecosistémicos ofertados por la cuenca • Características del clima • Procesos de erosión, sedimentación y acumulación de arenas	
Vulnerabilidad ante la afectación de las personas por la contaminación con metales pesados	• Condiciones de pobreza • Dependencia del recurso hídrico contaminado • Desigualdad en el acceso a la información • Alimentación insuficiente	• Deficiencia en la promoción y prevención en salud • Precariedad en los servicios de atención en salud • Precariedad en los servicios educativos • Acceso limitado a agua potable y saneamiento

-
- Precariedad en las condiciones de vivienda
-

Fuente: Elaboración propia (2025)

7.2.2. Caracterización de los factores asociados a la amenaza

La amenaza inicialmente propuesta en el grupo focal para el diálogo sobre los factores asociados fue la contaminación por metales pesados en el agua superficial y los sedimentos del río Quito. Sin embargo, durante la discusión, se identificaron dos amenazas específicas: (i) la deposición de metales pesados en zonas de cultivo como consecuencia de desbordamientos o alteraciones hidráulicas del río Quito, lo que está directamente relacionado con su dinámica hidrológica; y (ii) la presencia de minería aluvial ilegal en la cuenca del río Quito, asociada al uso actual del suelo en la subcuenca. Los participantes del grupo focal señalaron que la magnitud, duración y extensión geográfica de estas amenazas están determinadas por una serie de factores tanto directos como indirectos, los cuales se describen a continuación:

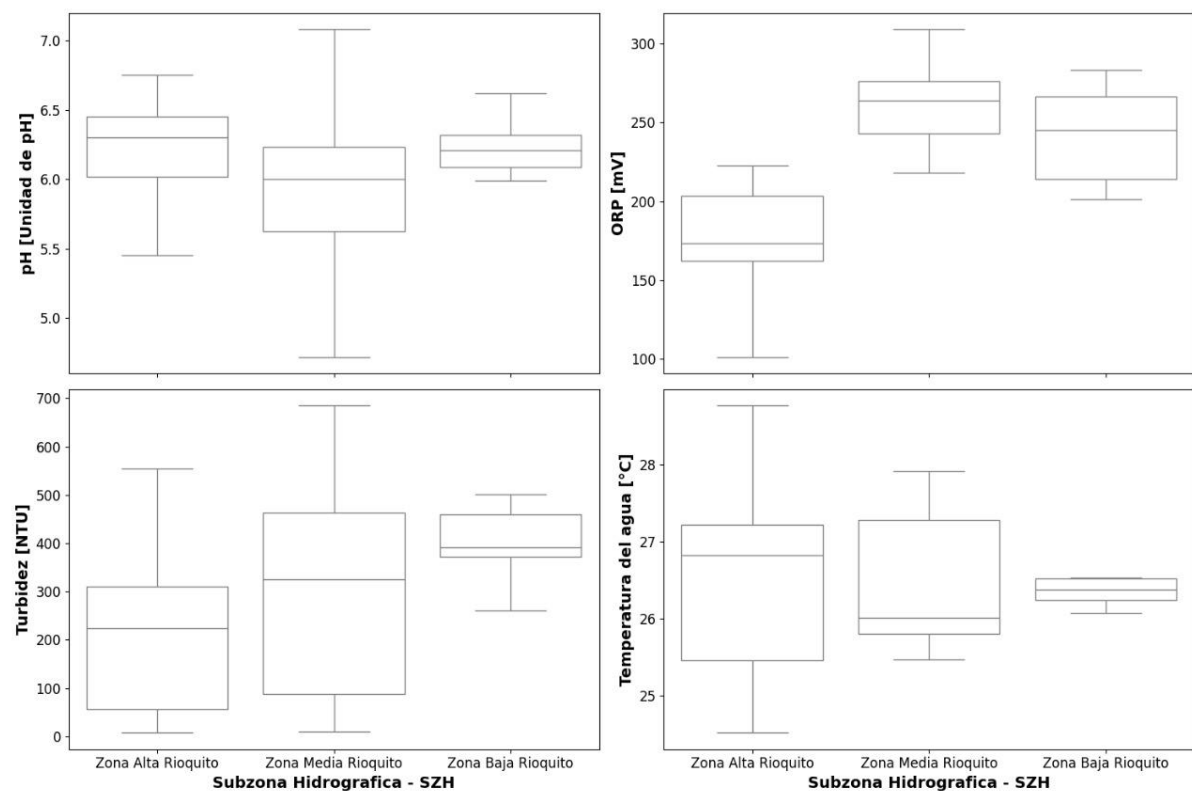
- **Características fisicoquímicas y concentración de metales pesados en el agua superficial**

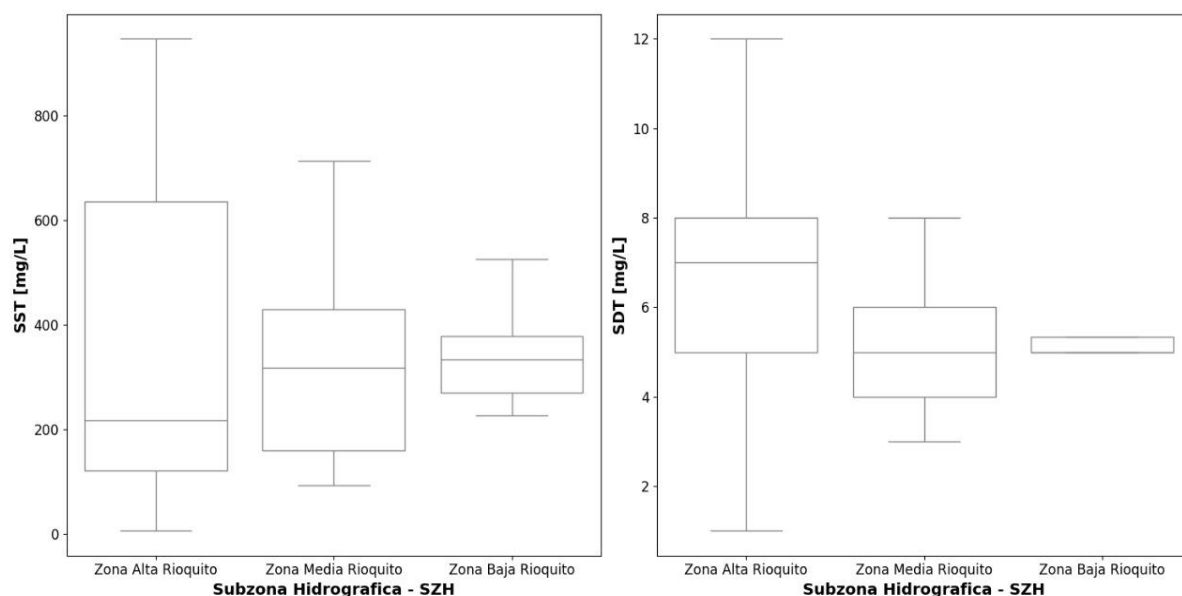
El gráfico presenta los valores medidos de parámetros fisicoquímicos en el agua superficial, evidenciando que el pH, los sólidos suspendidos totales (SST) y la turbidez superan en algunos casos los límites establecidos por la normatividad colombiana. El pH promedio fue de $6,09 \pm 0,54$; con variaciones entre ligera acidez y alcalinidad. Su disminución puede asociarse a la oxidación de sulfuros presentes en los yacimientos auríferos, mientras que su aumento sugiere la influencia de carbonatos en la interfase sedimento-agua (Llorente-Valbuena; Fierro-Morales, J., 2019). Si bien no se identificaron puntos de muestreo con altos niveles de acidez, es crucial reconocer que la amenaza de contaminación por metales pesados es más significativa en la zona media de la cuenca del río Quito, especialmente en sitios con un pH inferior a 6. Esto se debe a que los ambientes ácidos facilitan la movilización de los metales pesados (Miranda et al., 2021).

La turbidez media fue de $481,56 \pm 977,03$ NTU, superando los límites establecidos por la OMS (2017). Este alto valor se asocia a la elevada escorrentía generada por precipitaciones intensas (Girardi et al., 2016), lo que implica riesgos para la vida acuática y su uso doméstico o agrícola (Gebreyohannes et al., 2015; Murhekar, 2011; Zaidi, 2013).

La media de sólidos disueltos totales (SDT) fue de $6,70 \pm 3,71$ ppm; lo que se debió al alto caudal, la precipitación y la dilución por el incremento de las lluvias (Rahman; Jahanara; Jolly, 2021). Según la OMS (World Health Organization, 2017b) y la US EPA (United States Environmental Protection Agency. Office of Water, 2012), el SDT en este estudio estuvo por debajo de las pautas de calidad que manifiestan sus usos domésticos y de riego. No obstante, algunos sitios con alteración de la concentración de SDT indican que influye la descarga directa de desechos domésticos alrededor del río (Gebreyohannes et al., 2015). El contenido total de sólidos suspendidos del agua depende de la cantidad de partículas suspendidas, suelo y limo que está directamente relacionado con la turbidez del agua. El valor medio de SST fue de $528 \pm 1.047,06$ ppm y asegura su origen directo de la escorrentía producto del incremento de las lluvias en zonas degradadas por minería (Aktar; Moonajilin, 2017). De acuerdo con las pautas de calidad, la concentración actual de SST supera los criterios de calidad de la US EPA, pero se mantiene dentro de los criterios de calidad de la OMS. Finalmente, los valores de ORP y Temperatura no reflejan aspectos asociados a contaminación.

Figura 13. Parámetros fisicoquímicos del agua superficial





En la Tabla 26 se resumen las concentraciones de los metales pesados evaluados. La mayoría de los valores máximos de los elementos tóxicos disueltos como Cadmio, Cobre, Níquel, Plomo, Zinc, Cromo y Arsénico en el agua del río Quito se concentraron en los puntos No. 59, 60, 62, 63 y 65, sitios ubicados en la cuenca alta del río Quito dentro del municipio de Unión Panamericana, Cantón de San Pablo e Istmina, donde la expansión de zonas degradadas por minería es más extensa y se evidencia una mayor dinámica en la extracción ilegal de oro. Para el caso de Hg, a pesar de que las concentraciones en el agua están por debajo de los límites permisibles establecidos en las normas, las concentraciones tuvieron una tendencia a incrementarse en la zona alta de la cuenca en los sitios de muestreo ubicados en Istmina (municipio donde se evidencian afectaciones por la minería ilegal). Es importante destacar que el Cadmio presentó un incremento significativo en el río Cértegui, uno de los tributarios principales del río Quito donde existen entables mineros que afectan la calidad ambiental y la salud humana (Mena Palacios; Moreno Rodallega, 2019).

Tabla 26. Resultados de la concentración de metales tóxicos

Elementos tóxicos disueltos (µg/L)				Elementos tóxicos totales (µg/L)			Límites permisibles Decretos 1594 de 1984 y 1076 de 2015			
Elemento	Mínimo	Máximo	Promedio ± DS	Mínimo	Máximo	Promedio ± DS	Para potabilización	Consumo humano y doméstico	Uso agrícola	Uso pecuario

As	0,06	0,43	0,148 ± 0081	3,32	14,9	5,15 ± 2,49	50	50	100	200
Cd	0,01	0,29	0,04 ± 0,07	0,01	0,41	0,082 ± 0,076	10	10	10	50
Cr	0	0	-	1,1	132	21,29 ± 19,88	-	-	-	-
Cu	0,5	20,8	2,12 ± 3,00	1,3	146	21,42 ± 22,99	1000	1000	200	500
Hg	8	8	8	7	155	29,58 ± 24,68	2	2	-	10
Ni	0,4	43,4	2,92 ± 7,89	0,09	55,4	12,67 ± 11,42	-	-	-	-
Pb	0,05	0,4	0,11 ± 0,06	0,35	38	3,71 ± 5,32	50	50	5000	100
Zn	0,9	71	4,57 ± 11,90	9,4	203	47,18 ± 34,19	15000	15000	2000	2500 0

Fuente: (Fondo Colombia en Paz; Universidad de Córdoba; Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible, 2023)

La concentración de metales disueltos en agua resultó ser menor a la establecida por la normatividad colombiana para distintos usos, entre los cuales se destacan el consumo humano, preservación de flora y fauna, y agricultura. Sin embargo, parámetros fisicoquímicos como los sólidos suspendidos totales y la turbidez demuestran afectación sobre la calidad del recurso hídrico como consecuencia de la alteración geomorfológica que ocasiona la minería ilegal en la cuenca, por tanto, es necesario analizar la concentración de esos metales pesados también en los sedimentos, con el fin de evaluar los efectos de la deposición por procesos de adsorción sobre las partículas (Miranda et al., 2021).

La influencia de la turbidez y los sólidos suspendidos totales se evidencia en los resultados del ICOMINERA cuyo promedio de acuerdo con los valores por punto ubicados en la cuenca alta, media y baja se presentan en la Tabla 27. Los resultados evidencian resultados de contaminación media en las 3 zonas, siendo que para la cuenca baja el valor está en el límite entre contaminación media y alta.

Tabla 27. Valores promedio por zona de la cuenca hidrográfica del río Quito.

SUBZONA HIDROGRÁFICA DEL RÍO QUITO	ICOMINERA
Cuenca baja de río Quito	0,5984
Cuenca media de río Quito	0,5492
Cuenca alta de río Quito	0,4684

Fuente: (Fondo Colombia en Paz; Universidad de Córdoba; Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible, 2023)

- **Concentración de metales pesados en sedimentos**

Las propiedades físicas de los sedimentos muestreados evidenciaron una variabilidad textural a lo largo del sistema fluvial, influenciada por la dinámica hidrodinámica y geomorfológica de la cuenca. En el lecho del cauce principal predominan texturas arenosas con alta presencia de grava, mientras que, en las zonas alta y media, donde existen evidencias de minería de oro ilegal, los sedimentos presentan texturas más finas. En los tributarios, bifurcaciones del cauce principal y en la zona de desembocadura del río Atrato, se identificaron depósitos limosos. Esta distribución responde a la disminución progresiva del gradiente de pendiente, lo que reduce la velocidad del agua y favorece la sedimentación diferencial. A medida que la energía del flujo disminuye, las partículas más pequeñas, que requieren menos energía para mantenerse en suspensión, se depositan en sectores de menor dinámica, como planicies de inundación y meandros, mientras que los sedimentos más gruesos quedan retenidos en las partes medias y altas de la cuenca (Azhikodan; Yokoyama, 2021).

Los resultados de la concentración de metales pesados en sedimentos, indicaron que para el caso del Arsénico y Plomo la mayor cantidad de sitios de muestreo se encuentran por debajo de los valores de referencia establecidas por las tablas Squirts de la NOAA (Oficina Nacional de Administración Oceánica y Atmosférica (NOAA), 2008), No obstante en la zona de los río Pató (As) y Quebrada Raspadura (As y Pb), los valores se encontraron por encima de la referencia TEL (Niveles de efecto umbral) y por debajo de PEL (niveles de efectos probables) indicando que ocasionalmente ocurrirán efectos biológicos adversos sobre los organismos, esto puede estar asociado al transporte del contaminante a través de los ríos que traen consigo gran cantidad de material suspendido durante las crecientes. Por su parte, los niveles de cadmio en la cuenca del río Quito son bajos no superando los 0,2mg/kg, cabe destacar que se observa una tendencia ligeramente mayor de acumular este contaminante en los sedimentos cerca a la desembocadura en el río Atrato.

Para el caso del Cromo se observó que más del 80% de los sitios superaron el valor de TEL mostrado por las tablas Squirts y en algunos casos también el valor PEL. Lo anterior puede representar un riesgo por exposición de este metal a las comunidades circundantes y muestra la amenaza asociada a la contaminación del recurso hídrico por este metal. Se evidenció una concentración muy alta de mercurio (Hg) en el sitio ubicado en el centro poblado de Puerto Pervel, superando los niveles de referencia, lo que se asocia al uso de este metal en las actividades mineras. La presencia de evidencias de minería aluvial en la zona respalda esta relación. El Hg tiende a acumularse en sus formas orgánicas y en las fracciones más finas de los sedimentos, un proceso influenciado por los factores hidrodinámicos locales. Además, la constante alteración del lecho y la geomorfología fluvial debido a la actividad minera genera una fuerte removilización del Hg, favoreciendo su redistribución en el sistema acuático.

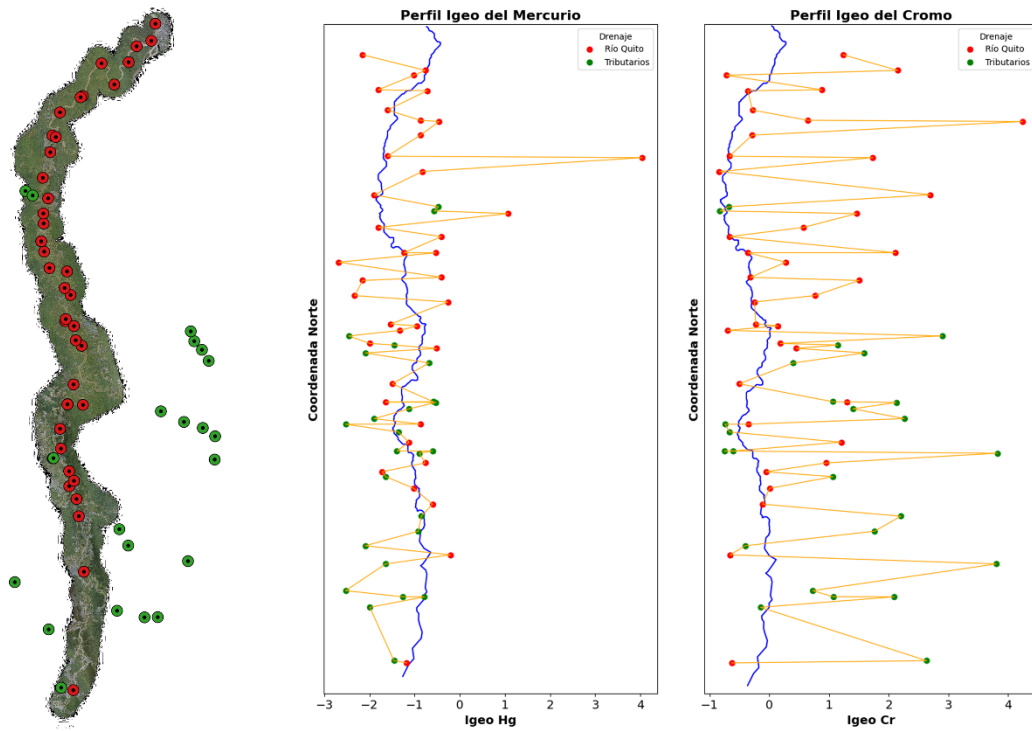
Las más bajas concentraciones de metales en sedimentos son encontradas para Cd y Hg, con niveles por debajo de 1 mg/kg, salvo en los casos detallados anteriormente. Los demás metales presentaron concentraciones en el siguiente orden $As < Pb < Ni < Cu < Zn < Cr$. Las bajas concentraciones de mercurio tanto en agua como en sedimentos se explican, en parte, por el uso extendido de técnicas artesanales de extracción de oro libres de mercurio como la conocida "tela brasileña". Este método, de bajo costo y operación manual, consiste en mezclar el material aurífero (compuesto por arena, grava y sedimentos con posibles partículas de oro) con agua, y verterlo sobre una rampa inclinada cubierta con una tela porosa. Durante el flujo, el agua arrastra los sedimentos más livianos, mientras que las partículas más pesadas, como el oro, quedan atrapadas en las fibras de la tela debido a su mayor densidad. Finalizado el proceso, la tela se retira y se lava cuidadosamente para recuperar el concentrado de oro adherido. No obstante, a pesar de las bajas concentraciones, el mercurio sigue representando una amenaza a la salud ambiental y humana en la cuenca del río Quito debido a sus propiedades de bioacumulación (Lara Rodríguez; Tosi Furtado; Altimiras Martín, 2019; Negrete et al., 2022). Por otro lado las bajas concentraciones de Cadmio obedecen a las propiedades del material parental y son consecuentes con resultados de otras investigaciones como la de Gallego-Ríos et al (2018), las cuales presentaron valores no significativos en especies de pescado, donde normalmente este metal se acumula (Gallego Ríos et al., 2018a).

De acuerdo con lo establecido en las tablas de referencia rápida Squirts de la NOAA, el níquel (Ni) y el cromo (Cr) sobrepasaron los niveles de efecto umbral donde se espera que ocurran ocasionalmente efectos adversos sobre la biota acuática (TEL) y los Límites de Efectos Probables sobre la biota (PEL) establecidos por la Canadian Council of Ministers of the

Environment (Canadian Council of Ministers of the Environment 2002, 2002). Por lo tanto, se considera que estos metales en conjunto con los otros presentes en los sedimentos implican un riesgo potencial para la salud ambiental y humana de los ecosistemas circundantes, es fundamental comprender que a pesar de que se analizan de manera independiente, cuando se trata de describir los factores asociados a la amenaza de contaminación del agua por metales pesados, la magnitud, el tiempo de duración y la extensión geográfica de esa amenaza se da para el total de los metales y así mismo el riesgo potencial que se manifiesta en cuencas de alta vulnerabilidad obedecerá a la integración de todos los metales que amenazan el ecosistema. Con la finalidad de interpretar los valores de concentración en función de los valores de referencia asociados a la geoquímica en el río Quito, se determinó el índice de geoacumulación (Igeo) para cada metal.

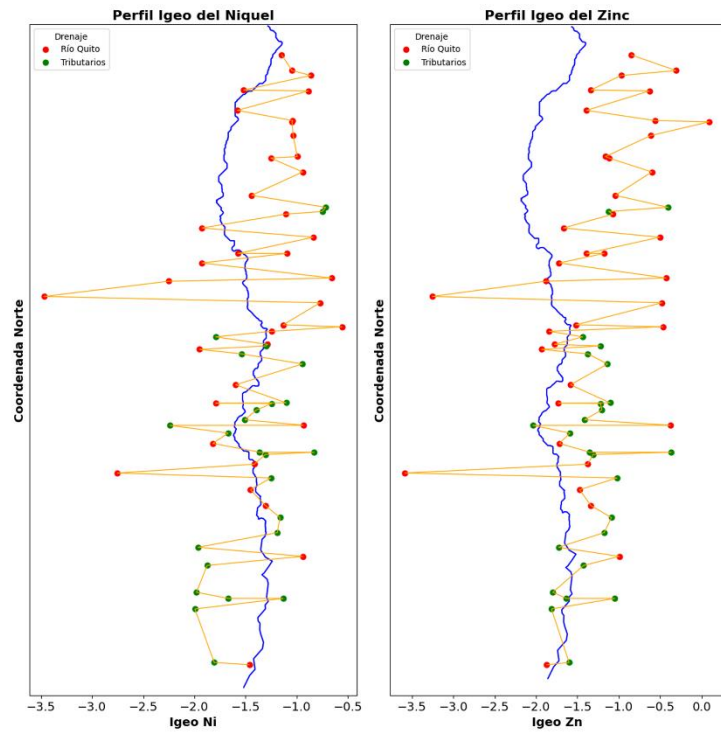
El valor background representa la concentración natural o de fondo geoquímico de un elemento en los sedimentos, determinada a partir de materiales no afectados por actividades antrópicas. En el cálculo del índice de geoacumulación (Igeo), las concentraciones medidas se comparan con estos valores de referencia para establecer el grado de alteración. Un Igeo elevado indica que la concentración medida supera significativamente el valor de fondo, lo cual se interpreta como contaminación, es decir, presencia de aportes antrópicos que incrementan la carga de un metal sobre el sistema sedimentario. Es importante diferenciar esta condición de enriquecimiento natural, que puede ocurrir por procesos de meteorización o aportes litológicos sin intervención humana. En este estudio, la superación de los valores de background acompañada de evidencias de minería aurífera en la cuenca alta permite atribuir los valores altos de Igeo principalmente a contaminación y no a enriquecimiento natural (Mondal et al., 2020).

Figura 14. Perfil del Igeo para Mercurio y Cromo



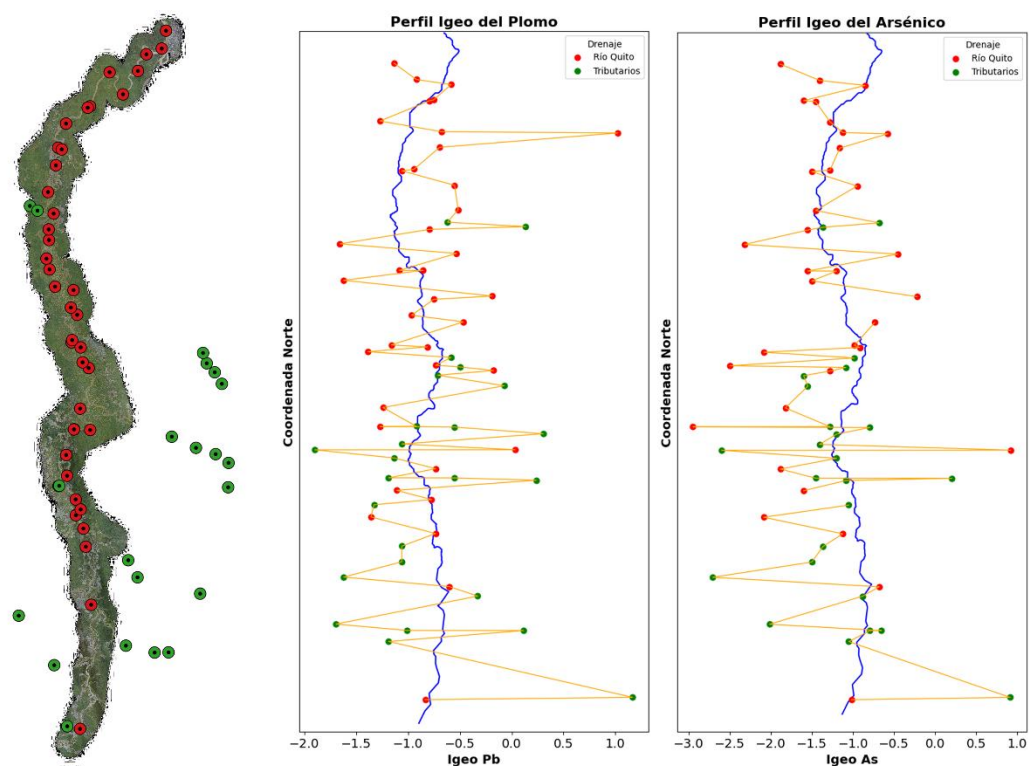
Fuente: Elaboración propia (2025)

Figura 15. Perfil del Igeo para Níquel y Zinc



Fuente: Elaboración propia (2025)

Figura 16. Perfil del Igeo para Plomo y Arsénico



Fuente: Elaboración propia (2025)

Los resultados del Igeo se calcularon a partir del valor *background* determinado por la Universidad de Córdoba, Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible y Fondo Colombia en Paz en el año 2023, a partir del análisis de distribución vertical de metales traza y radionucleidos en núcleos de sedimentos tomados en el río Quito a la altura de Paimadó. Los resultados de la distribución vertical por datación (Pb-210, Cs-137) y las tasas de acumulación de sedimentos estimadas indicaron una energía deposicional constante en el régimen de la cuenca a pesar de una alteración en el lecho del río principal como resultado del dragado de sedimentos por las prácticas de extracción de oro. El análisis geoquímico de los sedimentos permitió identificar la concentración dominante de Hg y Cr sobre el resto de los elementos analizados que variaron significativamente a través de la profundidad indicando una contribución preferencial de la meteorización natural de las fuentes rocosas locales y las influencias antropogénicas percibidas de las prácticas de minería de oro (Fondo Colombia en Paz; Universidad de Córdoba; Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible, 2023).

Para Ni y Zn los valores del Igeo en todos los puntos indicaron “no contaminación”. No obstante, en el caso del Hg, a pesar de que la mayoría no muestra ningún nivel de contaminación, algunos puntos en la cuenca baja indicaron contaminación moderada hasta muy alta, caso que también se presentó en el caso del Cr con la diferencia de que un notorio número

de puntos presentó niveles por encima de contaminación moderada. En este sentido, se denota una clara tendencia de los resultados de Igeo a aumentar de río arriba a río abajo, lo que podría estar representando la contribución de sedimentos contaminados con los elementos potencialmente tóxicos por los tributarios del río Quito a lo largo de su cauce, producto de actividades antropogénicas presentes en la cuenca alta. Finalmente, Pb y As, que difieren en esa tendencia registraron la mayoría de sus valores en la categoría de no contaminado, exceptuando sitios de la parte alta de la cuenca con una clara alteración de la geomorfología fluvial por dragado para minería de oro y en el caso de Pb un punto atípico de contaminación moderada en la parte baja de la cuenca, posiblemente asociado a la actividad minera en ese sitio del cauce principal.

Los resultados anteriores contrarían la percepción de la comunidad frente a los riesgos ambientales derivados de la contaminación por mercurio (Hg), reconocido ampliamente por su uso en la minería ilegal y su toxicidad para la salud humana, si bien es claro en sitios de la cuenca de río Quito como Puerto Pervel se han registrado concentraciones altas de Hg en sedimentos; los resultados toxicológicos indican bajas concentraciones en agua y sedimentos en la mayoría de los sitios. Este resultado confronta la percepción del riesgo y el conocimiento de los habitantes de la cuenca, quienes ignoran la presencia y peligrosidad de otros metales como el cromo (Cr) y el níquel (Ni), cuyos niveles en muchos sitios muestreados superan los umbrales críticos establecidos por normas internacionales y podrían estar generando efectos adversos sobre la salud ambiental de manera silenciosa pero significativa.

El desconocimiento de la amenaza por metales distintos al mercurio representa una limitación para las comunidades y aumenta su vulnerabilidad, pues restringe la capacidad de exigir intervenciones de remediación acordes con la magnitud y especificidad del impacto ambiental. En estos contextos, donde la exposición crónica a múltiples contaminantes puede tener consecuencias graves para la salud y el ambiente, una percepción del riesgo mal orientada favorece decisiones institucionales que priorizan problemas conocidas, pero que no son prioritarios desde el punto de vista toxicológico.

- **Comportamiento hidráulico del río Quito**

Las alteraciones del sistema fluvial asociadas con la exhaustiva extracción aurífera incluyen el dragado y vertido indiscriminado de sedimentos dentro del cauce del río Quito y

sus afluentes, así como la construcción de extensos canales y pozas mineras en la llanura de inundación del río y sus afluentes principales.

Como resultado de lo anterior, en la actualidad se observan impactos altamente perjudiciales en toda la red hidrográfica de la subcuenca, tales como la producción excesiva de sedimentos que promueve la turbiedad y la removilización de metales pesados propios de la geoquímica de las formaciones sedimentarias que constituyen la subcuenca, la reducción de las pendientes de los cauces aluviales y con esta la pérdida de la capacidad de transporte de sedimentos que genera la agradación del lecho y la colmatación de canales, entre otros.

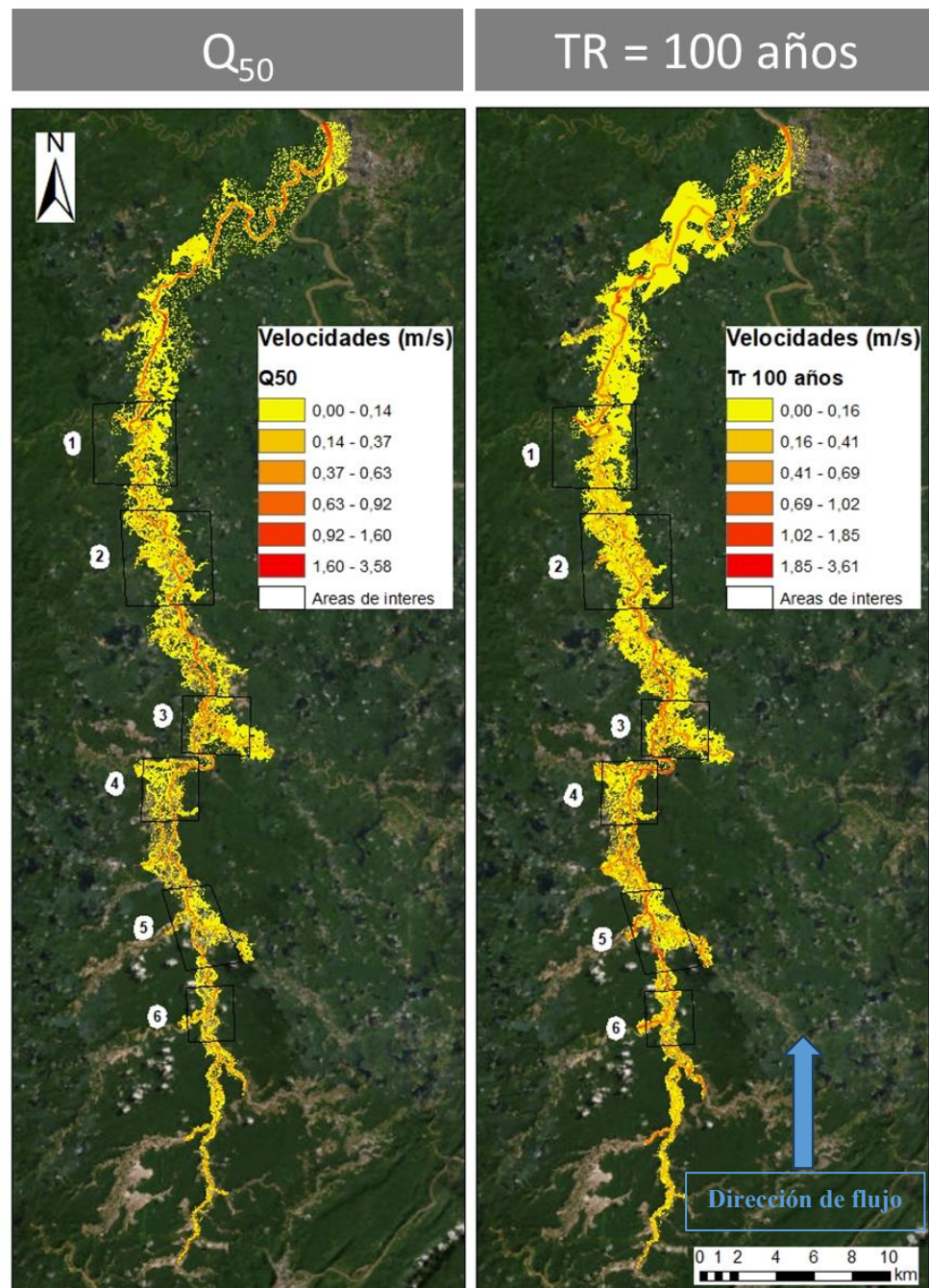
La minería es fuente de contaminantes, tanto por los procesos de beneficio aurífero requeridos como por la removilización de elementos presentes en los depósitos explotados. Como parte de los primeros, es decir, aquellos propios del beneficio minero, se cuenta el mercurio; mientras que, en los segundos, se considera el arsénico, el níquel, el plomo, el cromo y el cobalto, entre otros.

Los análisis geoquímicos indican que los valores promedio de los elementos metálicos en sedimentos activos finos, se encuentran dentro de los contenidos normales de la corteza terrestre, en particular entre 50 $\mu\text{g/kg}$ y 80 $\mu\text{g/kg}$ para mercurio; sin embargo, la removilización de los sedimentos que componen las formaciones geológicas presentes en la subcuenca de río Quito, puede llegar a incrementar las concentraciones en las zonas de acumulación en el canal.

La sinuosidad del río ha sido fuertemente afectada eliminando meandros y rectificando tramos, esta condición incrementa la línea de energía del río y con esta la velocidad; sin embargo, estos incrementos son parciales, de forma que al final solo contribuyen a acumular sedimentos en sitios específicos del canal donde actualmente se dificulta la navegación.

El modelo hidráulico del río Quito bajo las condiciones de alteración de la geomorfología fluvial que presenta actualmente fue elaborado utilizando el software HEC-RAS. Este se desarrolló para el caudal más probable (Q_{50}) y para un evento con periodo de retorno de 100 años que representa condiciones extremas, la siguiente figura presenta el mapa de velocidad máxima de todo el valle del río Quito, en el cual se destacan seis regiones detalladas más adelante.

Mapa 4. Mapa de velocidad máxima para el Q_{50} y para un evento con recurrencia de 100 años en el río Quito.



Fuente: (Fondo Colombia en Paz; Universidad de Córdoba; Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible, 2023)

Respectivamente, las seis regiones destacadas corresponden a:

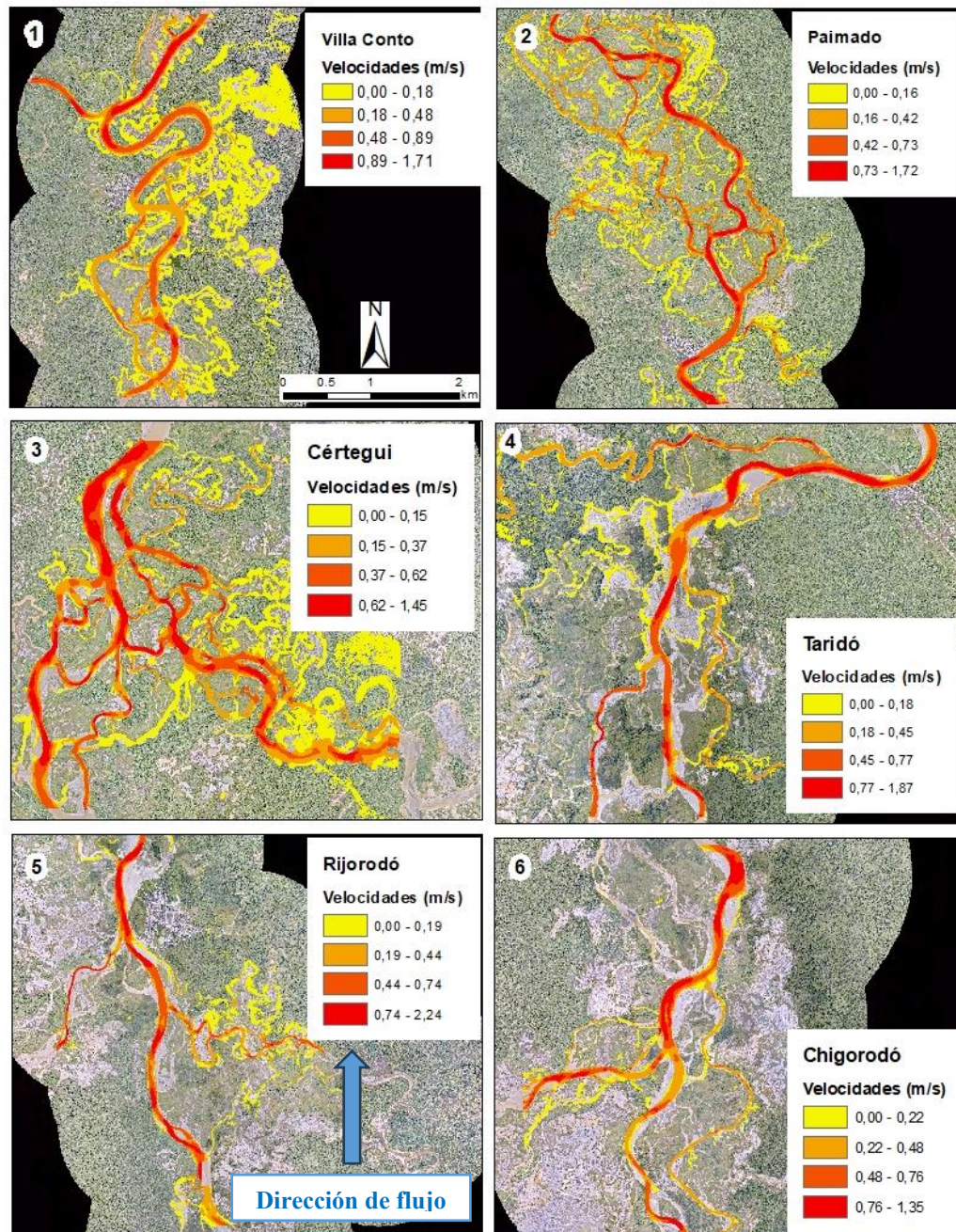
- Centro poblado de Villa Conto;
- Convergencia del río Paimadó y el municipio de Paimadó;

- Confluencia del río Cértégui;
- Confluencia del río Taridó y el centro poblado de Puerto Pervel;
- Confluencia del río Rijorodó y Centro Poblado del Cantón de San Pablo;
- Confluencia del río Chigorodó.

El mapa 4 muestra, que para los dos eventos simulados (Q50 y QTR100), las mayores velocidades están en el canal principal del río Quito donde está bien definido, que principalmente es cerca de la confluencia con el río Atrato. Sin embargo, un acercamiento sobre cada una de estas regiones (Mapa 5 y 6) permite observar velocidades en algunos canales secundarios de igual magnitud a las del canal principal, con una distribución menos homogénea, es decir, con concentración de velocidades altas. Dicha concentración de velocidad tiende a socavar las márgenes, favoreciendo, por lo tanto, la migración del cauce. Adicionalmente, las altas velocidades en algunos canales antrópicos promueven la erosión, resuspensión y transporte de sedimentos y contaminantes desde la planicie de inundación hacia el río Quito.

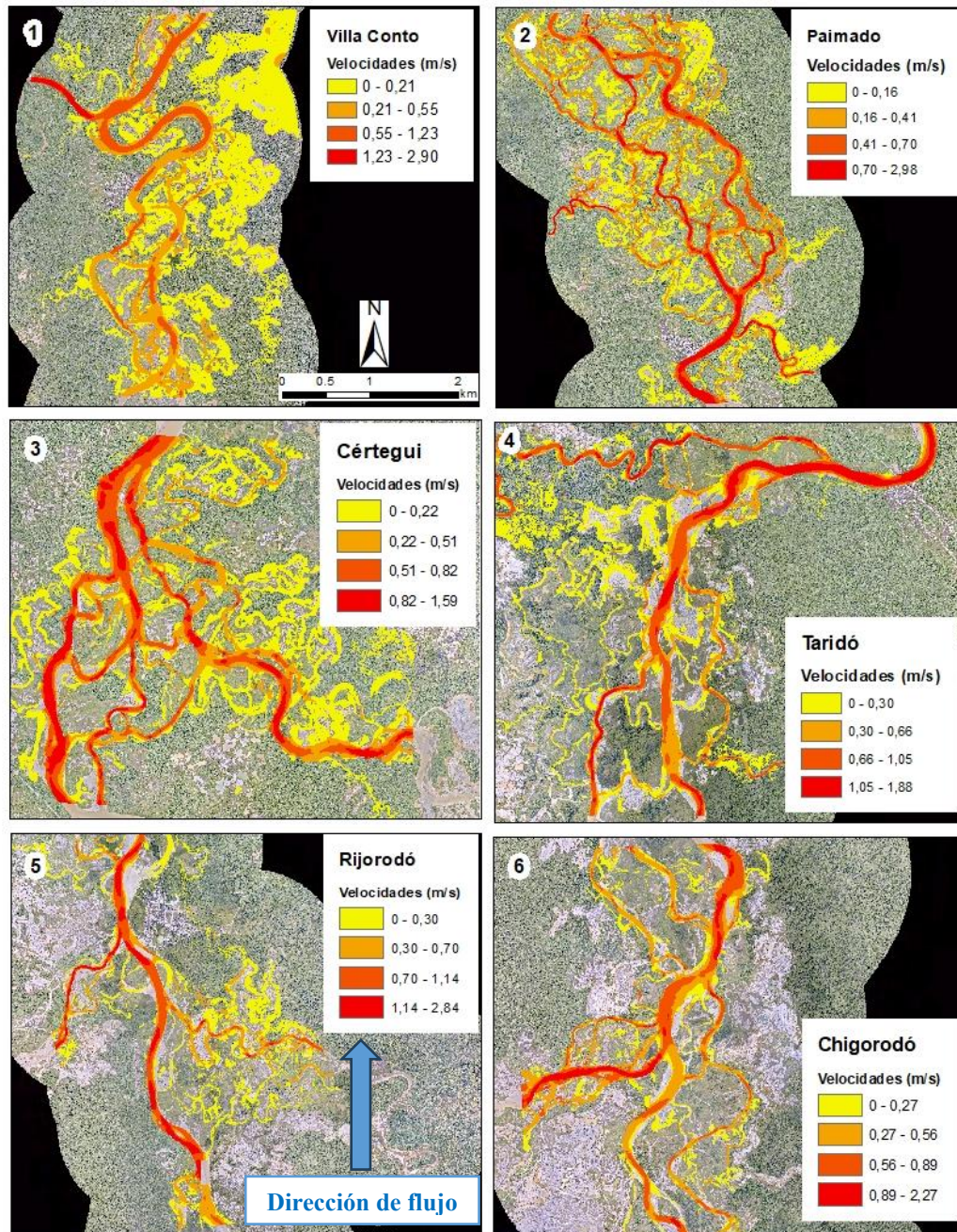
La existencia de cauces paralelos con ancho y velocidad comparables al cauce del río Quito muestra la pérdida de un canal principal bien definido a favor de un flujo difuso. La cantidad de canales interconectados aumenta a medida que se avanza aguas abajo. Sin embargo, aproximadamente 20 km aguas arriba del municipio de Quibdó, el río nuevamente se encaja en un único canal adquiriendo energía suficiente para transportar toda la carga de sedimentos, es en esta región donde no se desarrollan actividades de minería aluvial.

Mapa 5. Acercamiento al mapa de velocidad sobre regiones de interés para caudal más probable Q_{50} .



Fuente: (Fondo Colombia en Paz; Universidad de Córdoba; Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible, 2023)

Mapa 6. Acercamiento de mapa de velocidad máxima sobre regiones de para evento con recurrencia de 100 años.



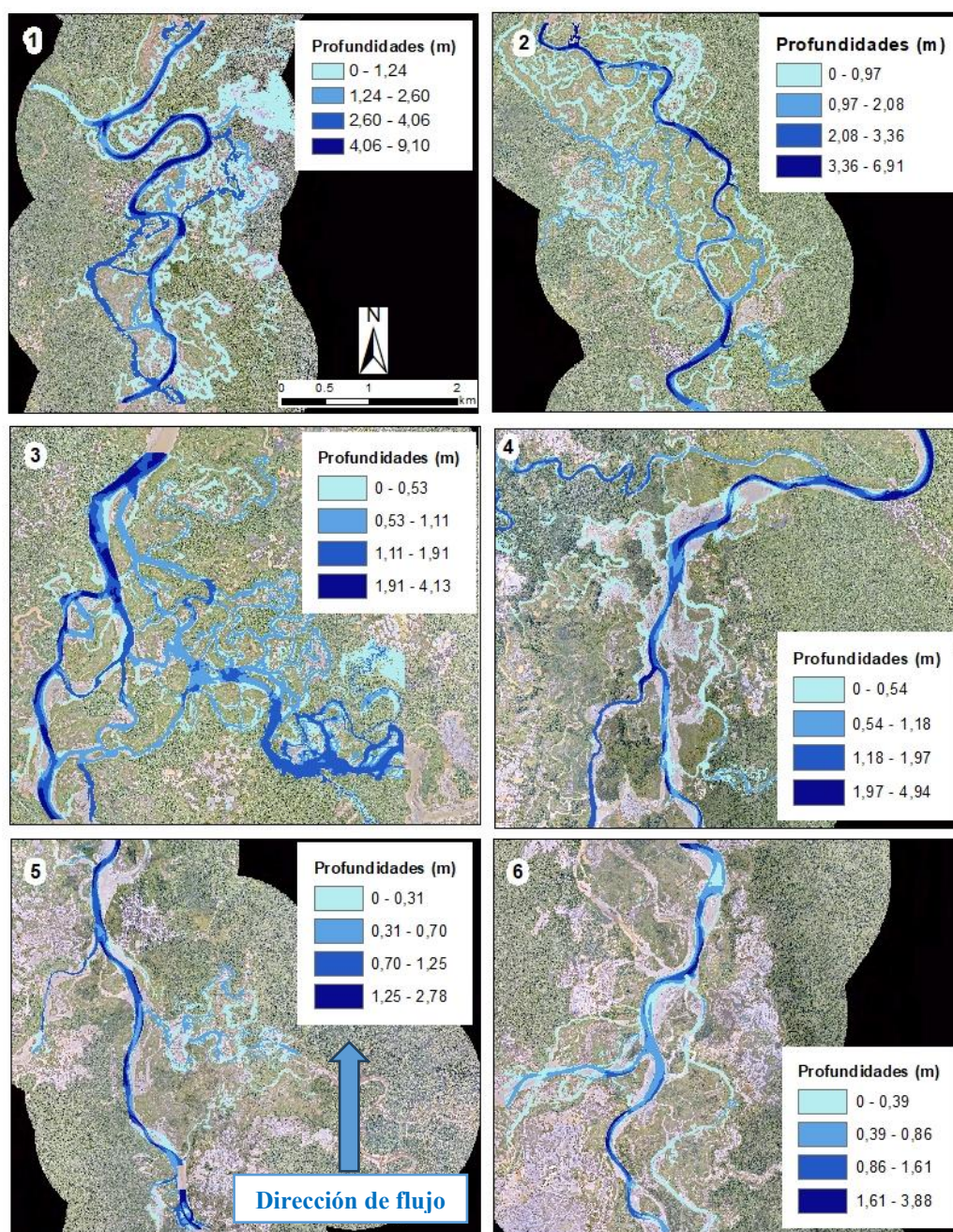
Fuente: (Fondo Colombia en Paz; Universidad de Córdoba; Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible, 2023)

Los mapas de profundidad del flujo para el caudal Q_{50} y para el evento con 100 años de recurrencia se presentan en el Mapa 7. Este mapa muestra mayor profundidad en los bordes externos de las curvas del cauce, lo que posibilita recirculación vertical (vórtices verticales).

Este fenómeno tiende a retirar material del lecho en el borde externo y depositarlo en el borde interno. Este tipo de fenómenos, recurrente a lo largo del río Quito, promueven un cauce altamente inestable.

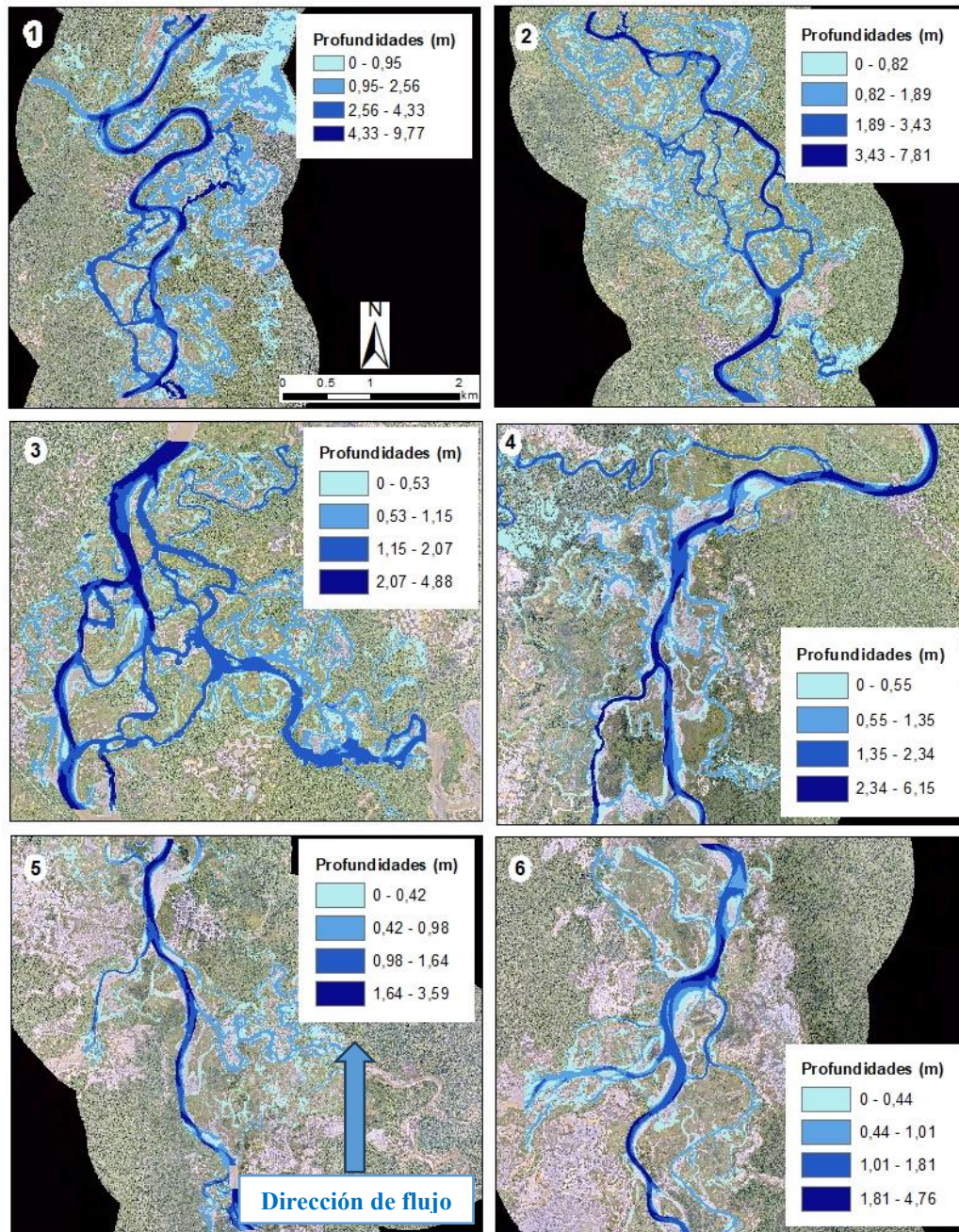
Cabe destacar que, el área inundada se va incrementando a medida que se avanza aguas abajo. Esto se debe principalmente a los factores que aumentan en esta dirección: la incorporación de afluentes (mayor caudal acumulado), la disminución de la pendiente del río y aumento del ancho del valle. En la mayor parte del río las áreas inundadas corresponden a la zona de explotación minera. Únicamente a 20 km aguas arriba de la confluencia con el río Atrato, las áreas inundadas pasan a ser típicamente de bosque alto.

Mapa 7. Acercamiento al mapa de profundidad sobre regiones de interés, para caudal más probable Q_{50} .



Fuente: (Fondo Colombia en Paz; Universidad de Córdoba; Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible, 2023)

Mapa 8. Acercamiento al mapa de profundidad máxima sobre regiones de interés, para evento con periodo de retorno de 100 años.



Fuente: (Fondo Colombia en Paz; Universidad de Córdoba; Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible, 2023)

A partir de la simulación del evento máximo con recurrencia de 100 años, se puede afirmar que no se identificaron proyecciones de inundación en las poblaciones localizadas cerca de las márgenes del río Quito. No obstante, es importante indica que el modelo hidráulico no considero el efecto de la confluencia entre el río Quito y el río Atrato que se da frente a la

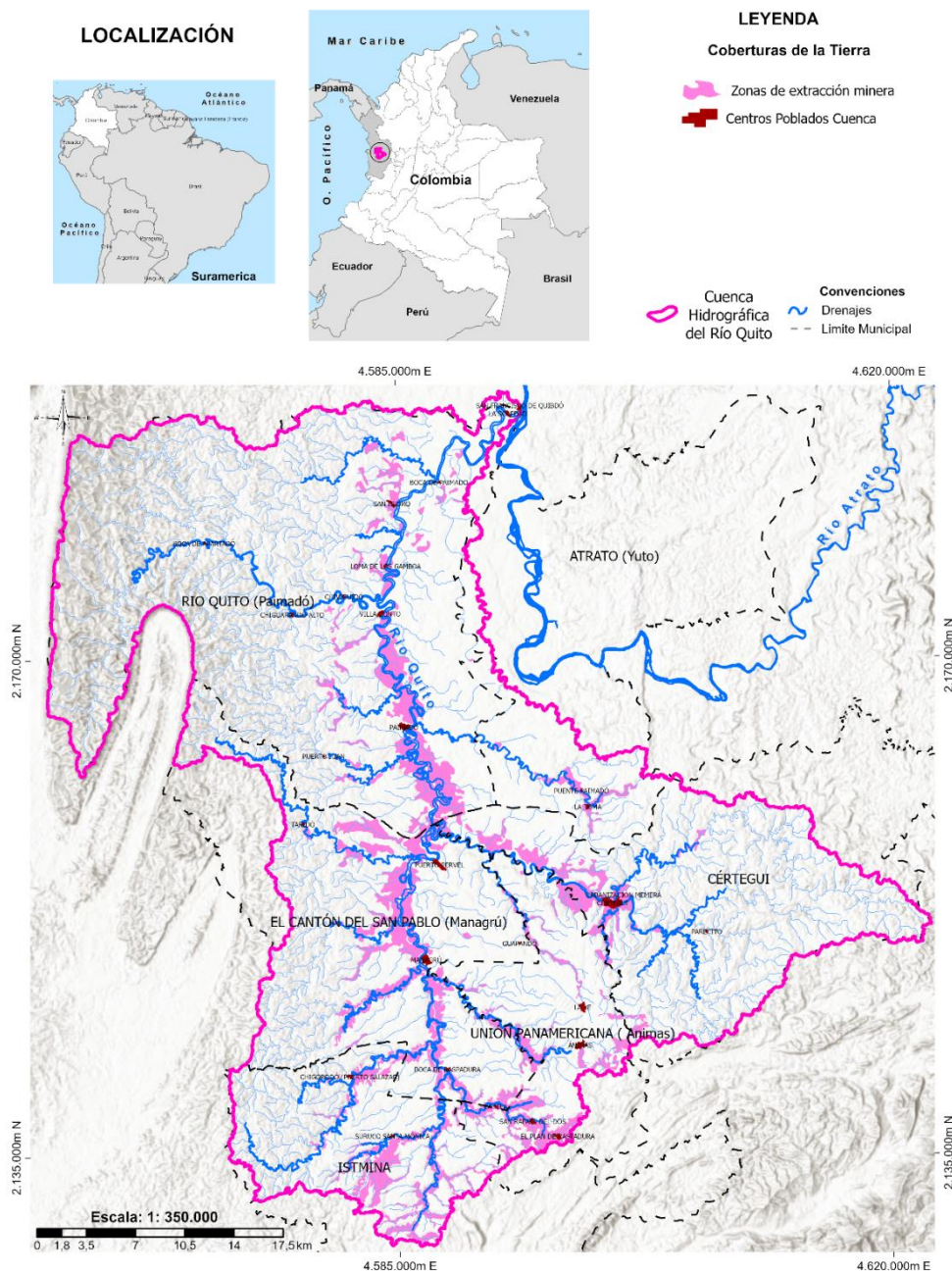
cabecera urbana de Quibdó, es fundamental desarrollar un modelo hidráulico de todo el río Atrato que permita una evaluación integral de la cuenca.

La percepción de la comunidad sobre la afectación de la geomorfología fluvial coincide con los resultados del análisis hidráulico del río, lo cual refuerza la validez técnica de estos hallazgos. Entre los impactos identificados por líderes comunitarios en los espacios de participación generados en el marco del Convenio 705 de 2021, así como en escenarios de seguimiento a la Sentencia T-622 promovidos por entidades estatales y organizaciones de base comunitaria, se destacan la degradación física de las riberas, la apertura de canales secundarios mediante el uso de maquinaria, la formación de pozas en áreas previamente intervenidas por minería, los procesos intensificados de erosión y sedimentación, y, especialmente, las dificultades para la navegación. Este último aspecto reviste especial importancia dado que el río constituye la principal vía de transporte entre los centros poblados de la región.

- **Área afectada por minería ilegal en la cuenca**

Según el mapa de Coberturas de la Tierra elaborado por el IDEAM en 2020, la cuenca del río Quito presentaba una afectación por extracción minera que superaba las 16.000 hectáreas, como se muestra en el mapa 9. La mayor alteración se registró en la llanura de inundación del cauce y los tributarios principales, generando impactos significativos en la geomorfología fluvial, la navegabilidad y la configuración morfológica del río. Además, esta actividad ha contribuido a la contaminación por metales pesados, ya sea por vertimientos directos o por la removilización de estos elementos durante la remoción de sustratos mediante dragado.

Mapa 9. Área de extracción minera en la cuenca del río Quito

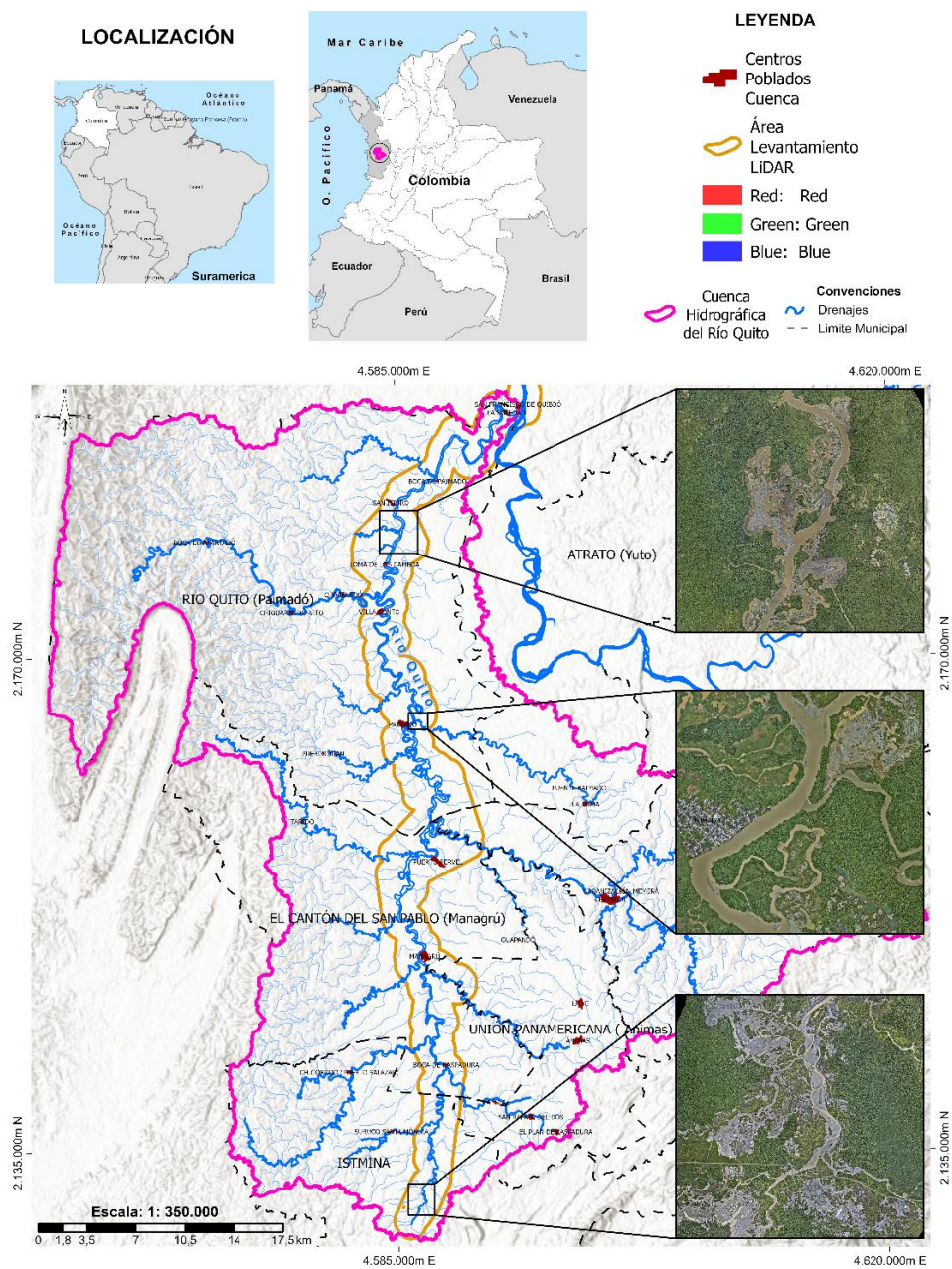


Fuente: Elaboración propia (2025)

En el siguiente mapa se muestran ilustraciones de sitios degradados por minería en la cuenca alta, media y baja, sobre el cauce del río Quito que reflejan la perturbación de la actividad minera en cada elemento constitutivo del medio físico, representando en si una amenaza asociada tanto a la degradación del medio físico como a la contaminación con metales pesados. La pérdida de caudales del canal principal hacia los innumerables canales minados en las llanuras de inundación es la causa fundamental de la reducción en la capacidad de transporte

de sedimentos aluviales que, a su vez, origina la agradación o sobrelevación del lecho que ahora impide la navegación normal a lo largo del río (Mount, 2020). Por otro lado, la minería aurífera ha hecho que exista un suministro ilimitado de sedimentos que son transportados durante cada período de aguas altas hacia el canal principal donde se acumulan restringiendo aún más la navegabilidad y elevando la turbidez del agua, como se evidencio en los resultados del muestreo.

Mapa 10. Perturbación del medio físico por la actividad minera

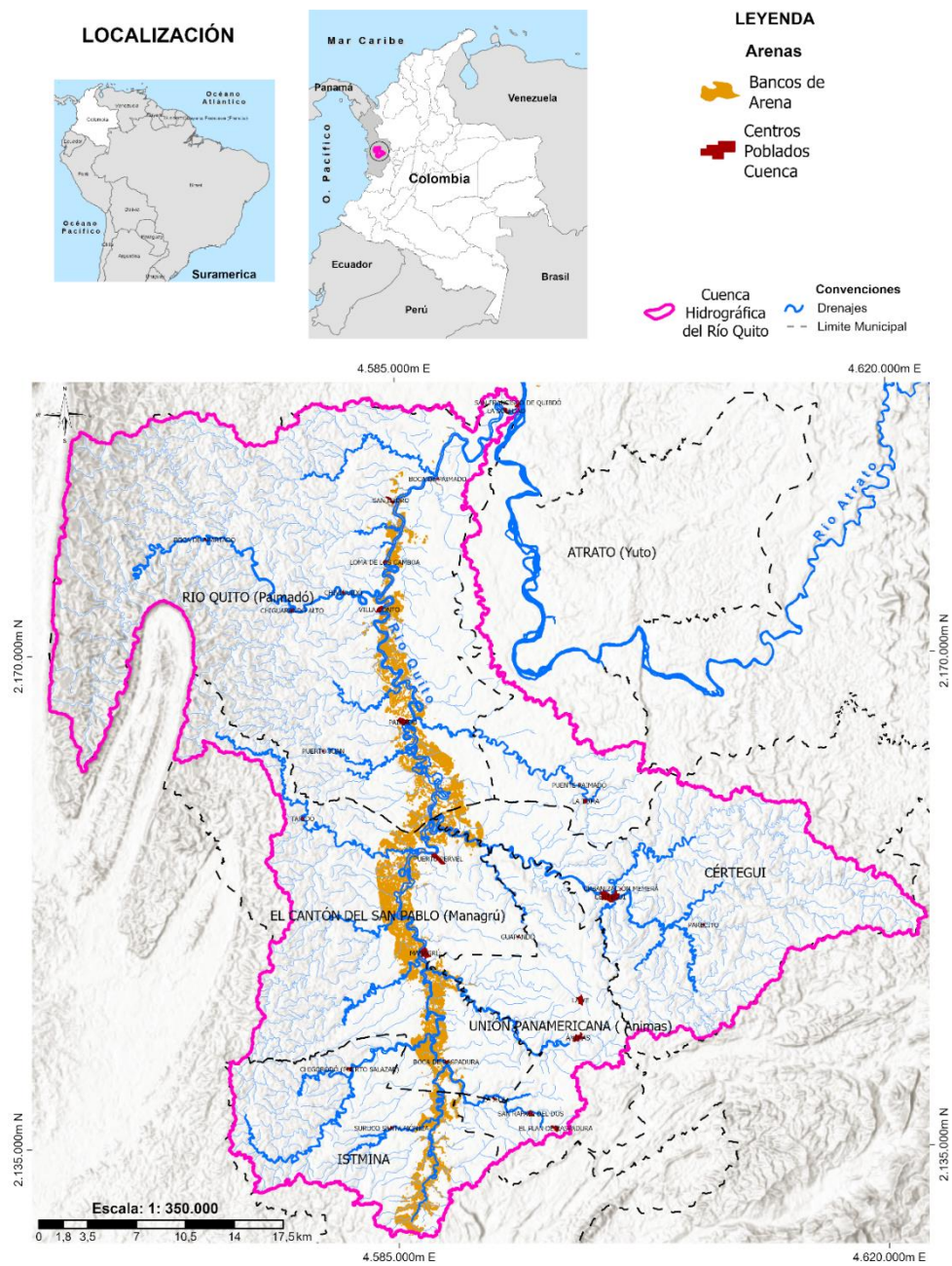


Fuente: Elaboración propia (2025)

- **Presencia de bancos de arena**

La acumulación de bancos de arena en las márgenes del río debido a la extracción minera representa un impacto a la geomorfología fluvial con repercusiones negativas hacia los servicios de regulación hídrica y navegabilidad que ofrece el río. Incluso, de acuerdo con lo establecido en la Sentencia T-622, la Corte Constitucional ordenó remover los bancos de arenas presentes en las riberas del cauce del río, como estrategia para la rehabilitación hidráulica. No obstante, la extensión de la minería mecanizada en el río hace poco viable esta acción, de acuerdo con el estudio realizado por el Fondo Colombia en Paz, la Universidad de Córdoba y el Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible, existen al menos 47 millones de metros cúbicos de arena distribuidos en 2810,7 hectáreas que se deben remover de las riberas del río Quito, estas cantidades implican costos económicos demasiados altos y requerirían de mucho tiempo para su implementación (Fondo Colombia en Paz; Universidad de Córdoba; Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible, 2023). El mapa presenta la distribución de bancos de arena en el río Quito.

Mapa 11. Bancos de arena en la cuenca del río Quito



Fuente: Elaboración propia (2025)

7.2.3. Caracterización de los factores asociados a la vulnerabilidad

- **Características de la geología y la geomorfología**

La composición geológica para la cuenca del río Quito, de acuerdo con el mapa del Servicio Geológico Colombiano del año 2015 (Ver Mapa 12), muestra la existencia de seis (6) unidades cronoestratigráficas, de las cuales llama la atención el área de los depósitos y llanuras aluviales Q-al, equivalente al 15% y que junto a las terrazas aluviales Q-t suman 43,47%.

Tabla 28. Unidades cronoestratigráficas presentes en la zona

Unidades Cronoestratigráficas de la cuenca del río Quito						
Era	Período	Época	Edad	Unidad	Descripción	% área
Cenozoico (CZ)	Cuaternaria (Q)	Holoceno		Q-al	Depósitos y llanuras aluviales	15,10%
		Pleistoceno		Q1-t	Terrazas aluviales	28,37%
	Neoceno (N)	Plioceno (N2)	Piacenziano (n8)	N2-Sc	Conglomerados y areniscas líticas conglomeráticas intercaladas con arcillolitas, limolitas y turbas	22,50%
		Mioceno	Aquitaniense (n1)	e8n2- Sm	Calizas, arenitas y lodolitas calcáreas	0,03%
			Mesiniense (n6)	n5n6- Sm	Arenitas líticas de grano fino con concreciones calcáreas intercaladas con limolitas y arcillolitas	31,16%
			Serravaliano (n4)	n3n4- Sm	Lodolitas, algunas calcáreas y nodulares, intercaladas con lentes de calizas y esporádicamente capas de arenitas de grano fino a muy fino	2,85%

Fuente: Servicio Geológico de Colombia (2015)

Las principales formaciones geológicas en la zona pertenecen a la formación Sierra, la formación Quibdó, y las terrazas y depósitos aluviales del cuaternario sobre los que corre el río Quito. La formación Sierra está formada por areniscas de grano fino con concreciones calcáreas, lodolitas con restos de moluscos y conglomerados. La formación Quibdó presenta conglomerados hacia la base y lodolitas y areniscas de grano fino hacia la parte superior. Los

depósitos del cuaternario contienen arcillas, arenas y gravas poco consolidadas, estos forman aluviones, sedimentos de playa y terrazas (Zapata, 2002).

Las características geológicas de la cuenca del río Quito influyen significativamente en su vulnerabilidad a la contaminación por metales pesados. La presencia de areniscas de grano fino y lodolitas en las formaciones Sierra y Quibdó aumenta la susceptibilidad a procesos erosivos y remoción en masa, especialmente en zonas con pendientes pronunciadas y durante eventos de lluvias intensas, frecuentes en la región. Estos procesos facilitan la movilización de sedimentos contaminados, favoreciendo la dispersión de metales pesados en el ecosistema acuático (Marrugo-Negrete et al., 2023a).

Asimismo, los depósitos aluviales cuaternarios, compuestos por arcillas, arenas y gravas poco consolidadas, presentan una alta permeabilidad, lo que facilita la infiltración y el transporte de contaminantes (Rosso-Pinto; Vergara-Flórez; Marrugo-Negrete, 2023). La minería aluvial ilegal en la cuenca del río Quito agrava esta situación, ya que implica la extracción masiva de sedimentos y la alteración directa del lecho y las riberas del río. Estas actividades, combinadas con la inestabilidad geológica de la zona, desestabilizan el cauce, modifican su morfología y alteran los patrones de flujo, aumentando la susceptibilidad a desbordamientos (Mount, 2020).

La morfometría de la cuenca del río Quito revela patrones hidrológicos y geomorfológicos que condicionan su vulnerabilidad a procesos de contaminación y alteraciones hidrodinámicas. En términos de área, la subcuenca del río Quito se clasifica como intermedia-grande, mientras que sus microcuencas varían desde pequeñas hasta muy pequeñas, lo que sugiere diferencias en los tiempos de concentración del flujo y en la respuesta a eventos de precipitación. La densidad de drenaje es predominantemente baja en trece unidades, incluida la subcuenca principal, lo que favorece la infiltración y reduce la escorrentía superficial; sin embargo, siete microcuencas presentan densidades medias, lo que indica una mayor probabilidad de generación de caudales más elevados en eventos de lluvia intensa (Mount, 2020; Universidad de Córdoba; Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible; Fondo Colombia en Paz, 2023).

El análisis de la relación de bifurcación muestra que las microcuencas más pequeñas tienen valores bajos, lo que implica una red de drenaje menos ramificada y, por tanto, con menor capacidad para concentrar rápidamente los caudales. Esta configuración hidrológica dispersa favorece una respuesta más lenta ante eventos extremos de precipitación, lo que se traduce en

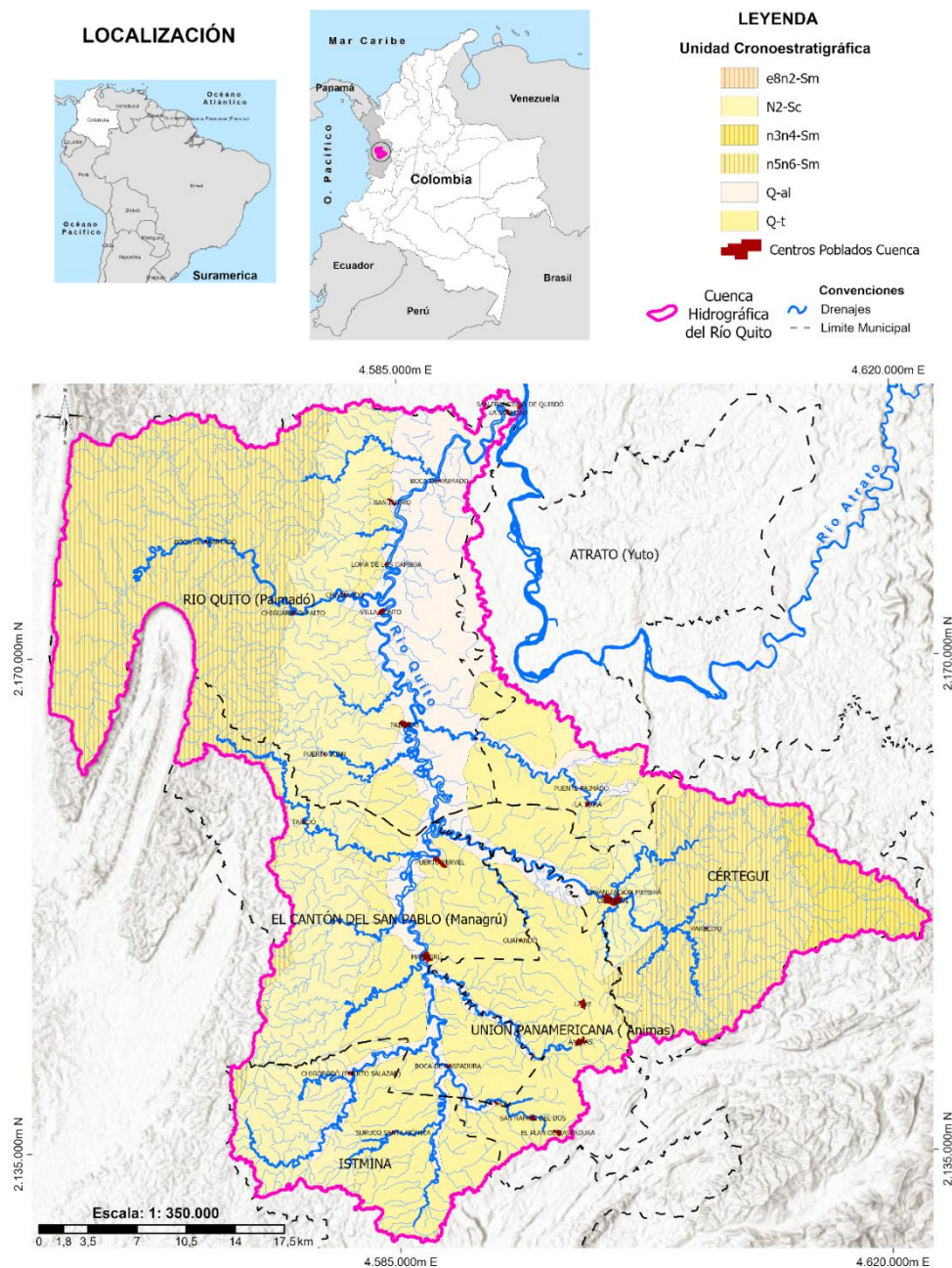
un riesgo relativamente bajo de crecientes súbitas, dado que el flujo de agua tiende a distribuirse de manera más gradual a lo largo de la red de drenaje. En contraste, las microcuencas con valores altos presentan redes de drenaje más desarrolladas y elongadas, lo que indica mayor riesgo de crecientes súbitas (Angillieri; Espejo; Lara, 2016). Las relaciones de forma indican que la mayoría de las unidades hidrológicas analizadas son alargadas, lo que implica un flujo de concentración más lento y un transporte predominante de sedimentos de granulometría fina, aspecto relevante para la dispersión de contaminantes en el sistema fluvial (Fondo Colombia en Paz; Universidad de Córdoba; Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible, 2023).

Desde un punto de vista hidráulico, la textura de drenaje varía entre fina y gruesa, con la subcuenca del río Quito clasificándose en la primera categoría, lo que sugiere un menor impacto hidrológico del relieve y la litología. Sin embargo, las unidades con texturas gruesas presentan mayor influencia del relieve en su respuesta hidrológica. La sinuosidad del cauce es alta en varias microcuencas, reflejando una dinámica fluvial que favorece la acumulación y redistribución de sedimentos, mientras que algunas cuencas con clasificación transicional pueden evolucionar hacia sistemas más meándricos debido a la alta producción de sedimentos. La longitud del flujo es alta en todas las unidades hidrológicas, lo que implica una tendencia a la infiltración significativa, aunque esta condición también incrementa la probabilidad de inundaciones en períodos de lluvias intensas debido a la saturación del suelo (Fondo Colombia en Paz; Universidad de Córdoba; Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible, 2023).

La presencia de puntos de inflexión en la curva hipsométrica sugiere la existencia de controles estructurales y litológicos que influyen en la estabilidad del sistema fluvial, condicionando la evolución morfológica de la cuenca y la redistribución de sedimentos. Asimismo, el índice global de pendiente indica que catorce microcuencas presentan relieves muy débiles y seis tienen características de relieve débil. Estas condiciones favorecen procesos de erosión progresiva y transporte prolongado de sedimentos en suspensión, debido a la baja capacidad de retención de materiales en pendientes suaves. Como consecuencia, la dinámica del cauce se caracteriza por una mayor deposición de sedimentos en tramos de menor pendiente, lo que puede generar colmatación, reducción de la capacidad hidráulica del río y mayor susceptibilidad a desbordamientos. En zonas con intervención antrópica, como aquellas afectadas por la minería aluvial ilegal, esta dinámica puede acentuarse, alterando la estabilidad del cauce y aumentando la erosión lateral, lo que contribuye a la expansión de los procesos de sedimentación aguas abajo (Fondo Colombia en Paz; Universidad de Córdoba; Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible, 2023).

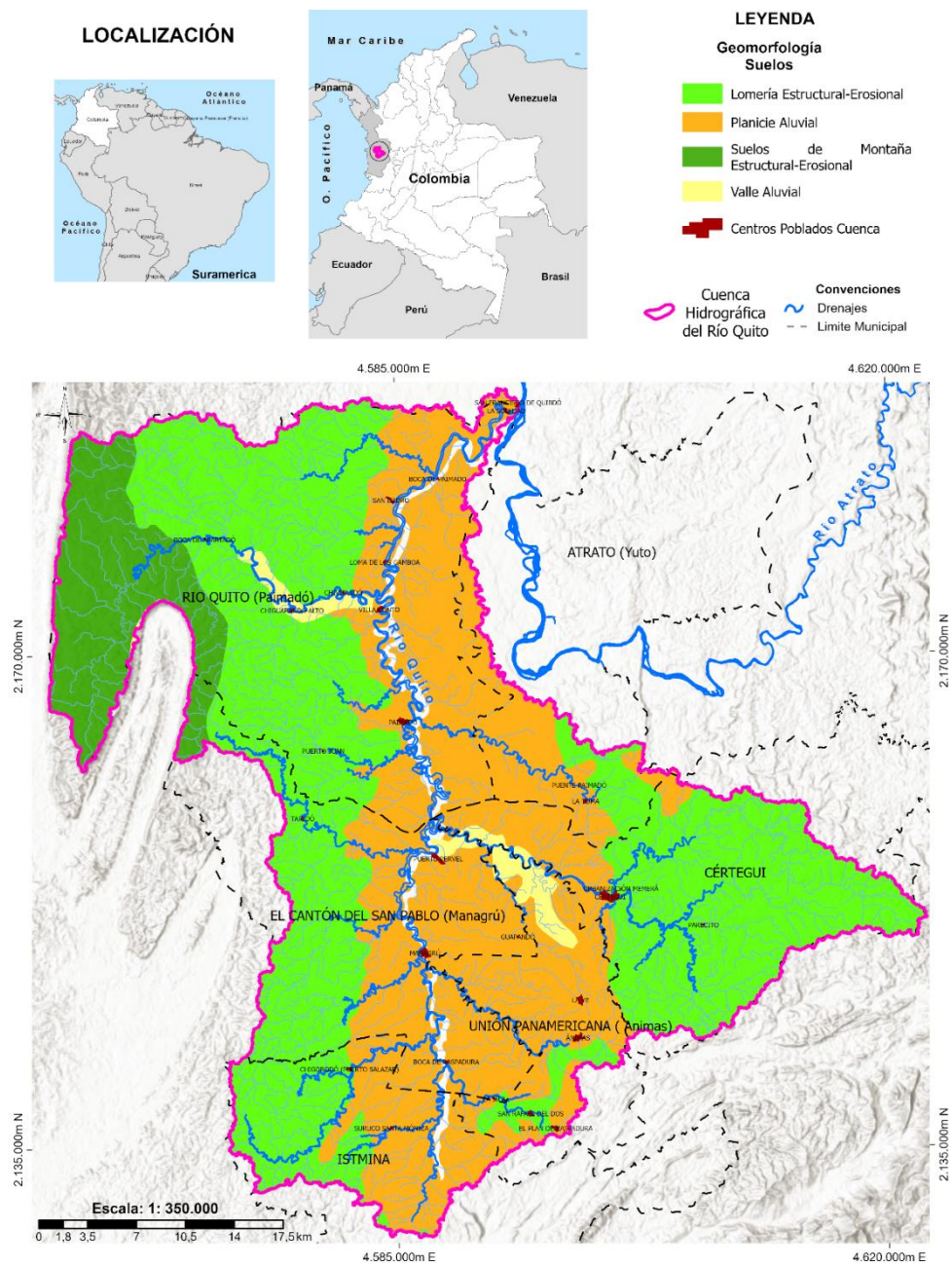
El Mapa 13, muestra las unidades geomorfológicas existentes marcadas por una planicie aluvial sobre el cauce principal del río Quito y un valle aluvial sobre los ríos Certegui y Pató envuelta por lomerío estructural-erosional. Por su parte en el Mapa 12 y 13, se detallan las geoformas asociadas a la cuenca y al cauce principal del río, respectivamente.

Mapa 12. Geología con centros poblados



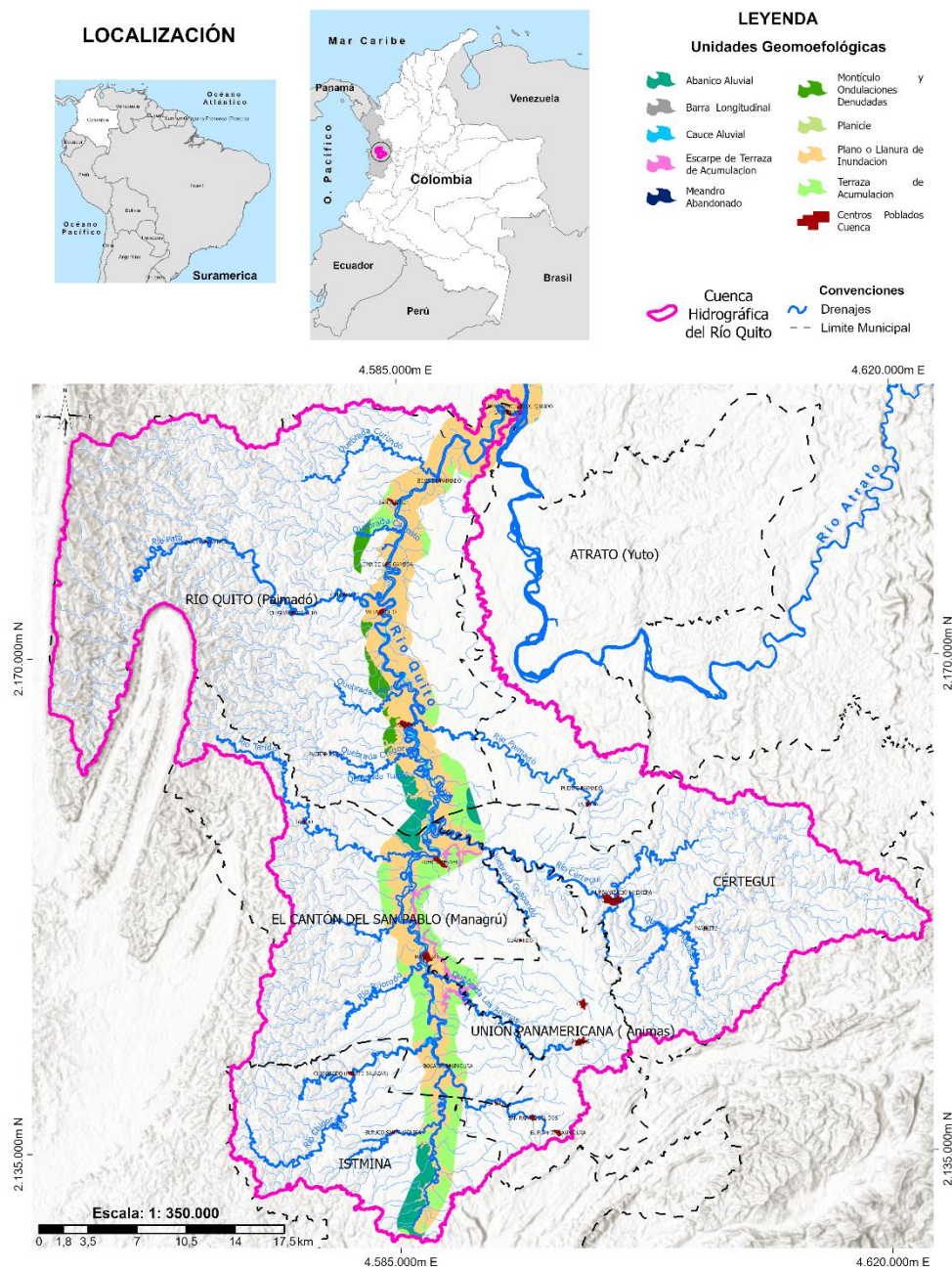
Fuente: Elaboración propia (2025)

Mapa 13. Geomorfología con centros poblados



Fuente: Elaboración propia (2025)

Mapa 14. Geomorfología asociada al cauce principal del río Quito



Fuente: Elaboración propia (2025)

De acuerdo con el Mapa 14, se identificaron dentro del área evolutiva del cauce principal del río Quito 10 unidades geomorfológicas utilizando para ello una ortofoto y un Modelo Digital de Terreno con resolución espacial de 1.0 metro. Debido a sus características de acumulación, transporte y erosión de sedimentos, estas unidades representan un factor de vulnerabilidad ante la amenaza de contaminación por metales pesados. El cauce aluvial (Fca) y las llanuras de inundación (Fpi) son altamente susceptibles a la contaminación, ya que facilitan

la movilización de metales pesados a través del flujo hídrico y su deposición en zonas de baja energía o en la desembocadura del río Quito en el Atrato. Las barras longitudinales (Fbl) y las terrazas de acumulación (Fta) pueden actuar como reservorios temporales de contaminantes, reteniendo partículas contaminadas en sus depósitos de arenas y limos. Además, los meandros abandonados (Fma), con suelos ricos en arcillas y materia orgánica, tienden a acumular metales pesados por procesos de adsorción y sedimentación prolongada (Ciszewski; Grygar, 2016; Palanques et al., 2014).

Las áreas de explotación minera (Aemc) representan la principal fuente de contaminación en la cuenca, contribuyendo a la dispersión de metales pesados hacia unidades geomorfológicas adyacentes. Los abanicos fluviotorrenciales (Faa) y los escarpes de terraza de acumulación (Ftae) favorecen el transporte y redistribución de sedimentos contaminados debido a su alta pendiente y dinámica erosiva. Por otro lado, las planicies (Dp) y los montículos denudados (Dmo) pueden sufrir acumulación difusa de contaminantes en suelos superficiales, especialmente en zonas con drenaje deficiente (Palacios-Valoyes; Salas-Moreno; Marrugo-Negrete, 2024).

La composición geológica de la cuenca del río Quito condiciona la presencia y distribución de metales pesados en los sedimentos. Las formaciones Sierra y Quibdó, constituidas por areniscas de grano fino, lodolitas calcáreas y conglomerados, así como los depósitos aluviales cuaternarios de arcillas, arenas y gravas poco consolidadas, favorecen la adsorción y acumulación de metales como As, Fe, Mn y, en menor proporción, Pb y Zn. Las terrazas aluviales (Q-t) y los depósitos y llanuras aluviales (Q-al), que cubren el 43,47% del área, actúan como reservorios naturales de partículas finas, con alta capacidad para retener metales de origen tanto geogénico como antrópico. En consecuencia, la detección de niveles moderados a altos de estos elementos en sedimentos puede asociarse parcialmente al sustrato geológico, especialmente en sectores con lodolitas y arcillas ricas en materia orgánica, que favorecen procesos de adsorción prolongada y formación de complejos metálicos (Capangpangan et al., 2016; Foster; Charlesworth, 1996; Hudson et al., 2018a).

La minería aluvial mecanizada en la cuenca intensifica la liberación y movilización de metales pesados al remover el sustrato natural y generar resuspensión de sedimentos finos. La extracción de gravas y arenas del cauce principal y sus planicies de inundación altera la morfología fluvial, desestabiliza terrazas y barras longitudinales y expone capas de arcillas y limos previamente consolidados, favoreciendo la resuspensión de partículas contaminadas y su

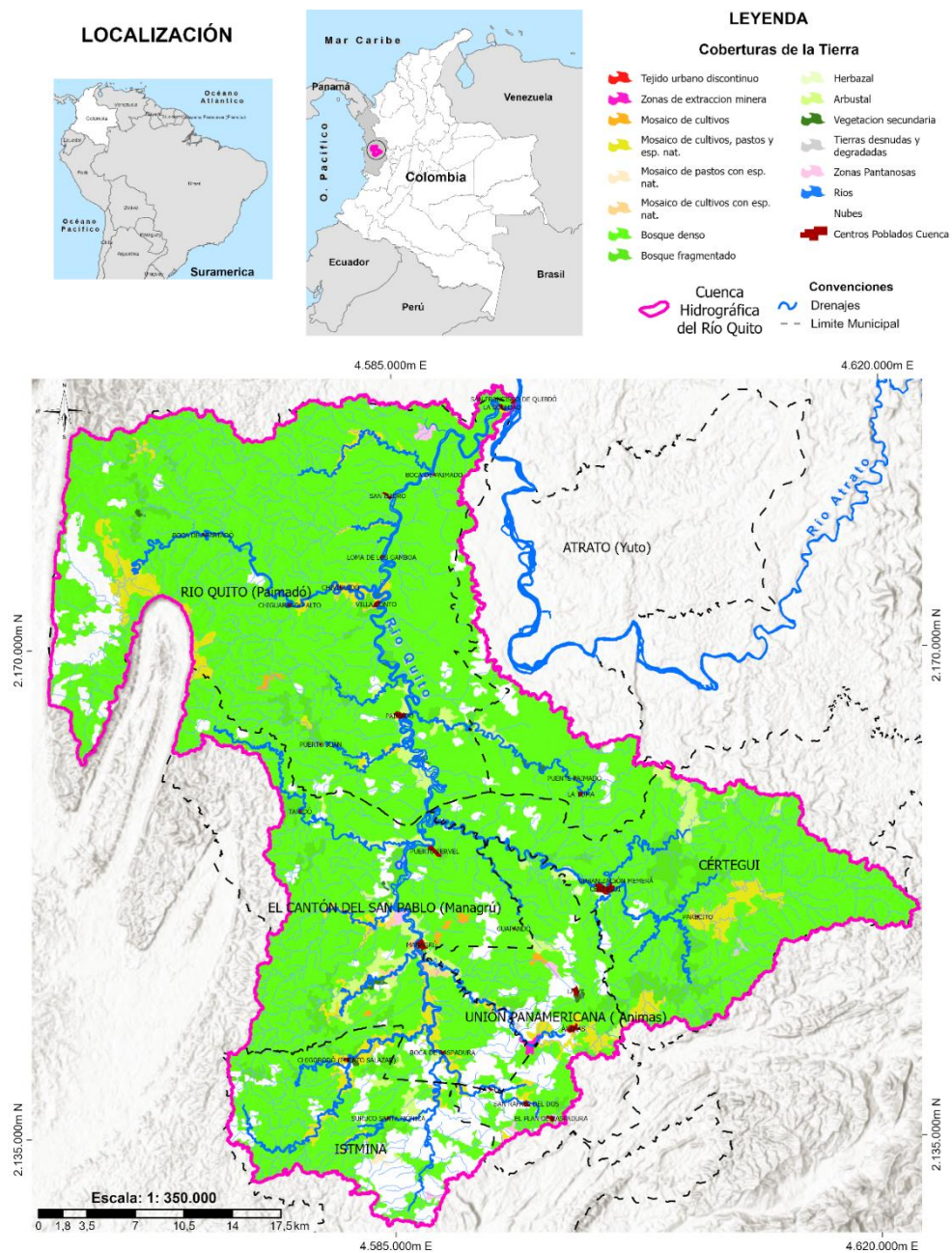
transporte aguas abajo hacia zonas de baja energía, como meandros abandonados o la desembocadura en el río Atrato. Este proceso incrementa el riesgo de dispersión secundaria de contaminantes, especialmente de Hg asociado a prácticas de amalgamación y de As y Fe liberados de matrices arcillosas y lodolíticas, amplificando la vulnerabilidad del sistema fluvial frente a procesos de contaminación difusa y acumulativa (Capangpangan et al., 2016; Foster; Charlesworth, 1996; Hudson et al., 2018a).

- **Uso y cobertura de la tierra**

A partir de los mapas generados por el Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales (IDEAM) en los años 2002 y 2020, se determinaron las condiciones de uso y cobertura de la tierra en la cuenca del río Quito. En los Mapas 15 y 16 se presentan las coberturas correspondientes a estos periodos. Para el año 2002, la cuenca estaba predominantemente cubierta por bosques densos con un bajo grado de intervención antrópica. Incluso en la llanura de inundación del cauce principal se evidenciaba la presencia de vegetación riparia, arbustales y bosques, lo que contribuía a la estabilidad del ecosistema. En este periodo, las zonas de extracción minera ilegal de oro con maquinaria eran mínimas e imperceptibles en el análisis espacial de coberturas, lo que sugiere que la minería predominante era artesanal o de subsistencia, con un impacto ambiental menor.

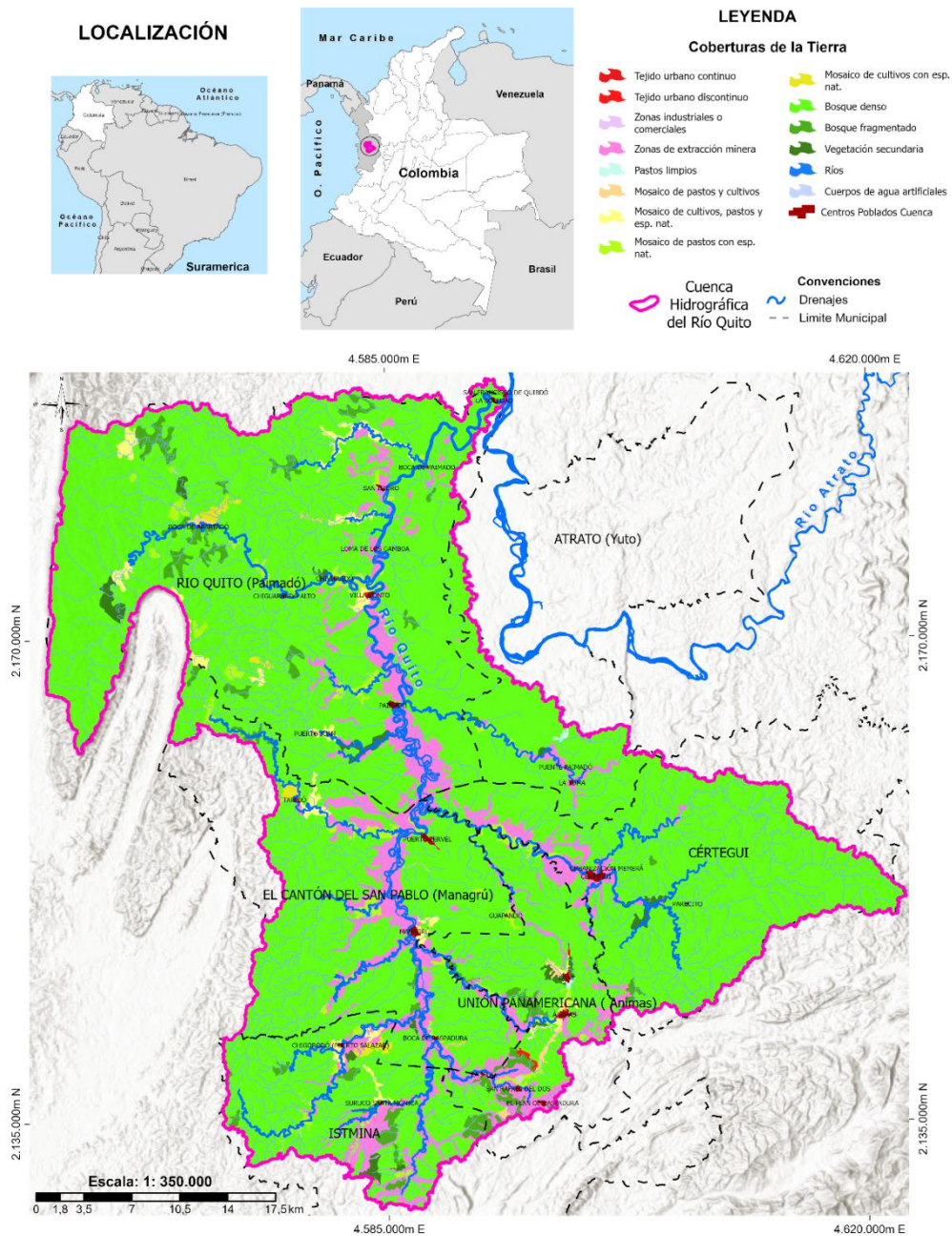
Para el año 2020, la cobertura forestal se redujo drásticamente debido al aumento significativo de las zonas de extracción minera, que pasaron de 109,95 hectáreas a 6.179,74 hectáreas en la ribera del cauce principal del río Quito y en algunos de sus tributarios más importantes. La expansión de la minería ilegal no solo aceleró la fragmentación del bosque, afectando la biodiversidad y la conectividad ecológica de la región, sino que también incrementó la vulnerabilidad del ecosistema a la contaminación por metales pesados. La pérdida de la cobertura vegetal, especialmente en áreas riparias, redujo la capacidad de filtración y retención de contaminantes, favoreciendo su movilización a través del sistema hídrico.

Mapa 15. Coberturas de la tierra a 2002 con centros poblados



Fuente: Elaboración propia (2025)

Mapa 16. Coberturas de la tierra a 2020 con centros poblados



Fuente: Elaboración propia (2025)

- Características de la edafología**

La cuenca del río Quito presenta una gran variedad de suelos, influenciados por su geomorfología y los procesos de sedimentación. En las zonas de lomerío denudacional, las unidades LUAc, LUAd y LUAe se caracterizan por suelos moderadamente profundos a profundos, bien drenados y de texturas moderadamente finas. Estos suelos, desarrollados sobre rocas sedimentarias clásticas limoarcillosas, son muy fuertes a fuertemente ácidos, con

contenidos de materia orgánica altos a moderados, pero su fertilidad es de baja a muy baja. En las áreas de montaña estructural, la unidad MULf presenta suelos superficiales a profundos, con texturas que varían entre moderadamente gruesas y finas, y una fertilidad que oscila entre moderada y alta, a pesar de su acidez y drenaje variable. Estos suelos se desarrollan sobre rocas sedimentarias clásticas arenosas y químicas carbonatadas, las texturas dominantes son del tipo franco arenoso (Instituto Geográfico Agustín Codazzi, 2011)

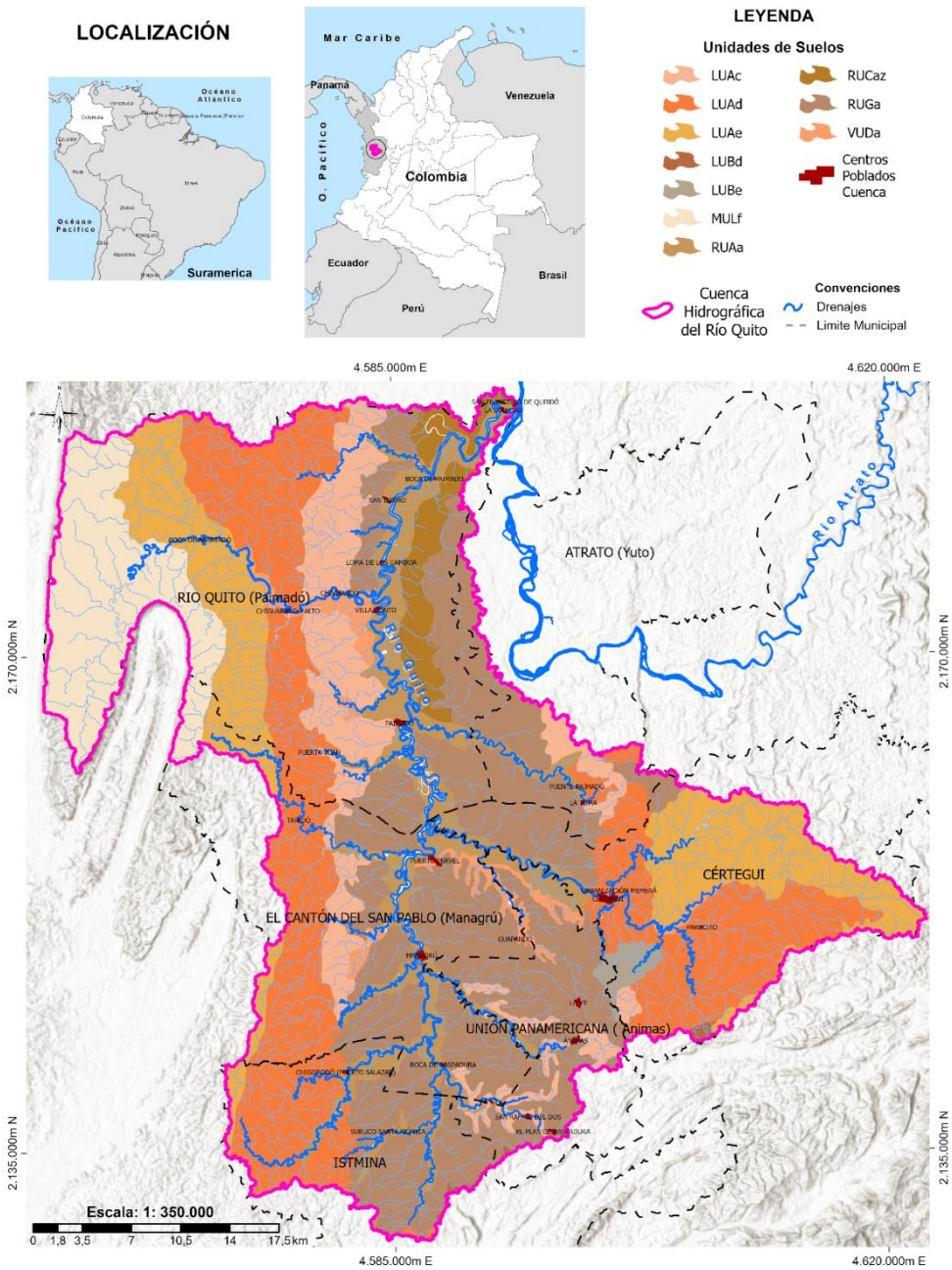
En la planicie aluvial, los suelos muestran una mayor diversidad debido a los procesos de sedimentación reciente. Las unidades RUAA, RUCaz y RUGa representan planos de inundación y terrazas con suelos que van desde muy superficiales hasta moderadamente profundos, con drenaje imperfecto a pobre y texturas medias a finas. Aunque presentan contenidos de materia orgánica que oscilan entre muy altos y bajos, su fertilidad es de moderada a alta en algunas áreas, especialmente en los planos de inundación. Estos suelos se desarrollan sobre depósitos clásticos hidrogénicos, como arcillas, limos y arenas, transportados por los ríos Quito y Atrato. En las terrazas, los suelos son más ácidos y menos fértiles, con texturas medias a finas y un alto contenido de materia orgánica (Gaviria; Angel-Amaya, 2020).

La unidad VUDa se distingue por suelos con fertilidad baja a moderada, texturas variables y drenaje pobre a moderado. Estos suelos se desarrollan sobre depósitos clásticos hidrogénicos, como arcillas y limos, y están influenciados por la dinámica fluvial de la cuenca. La composición mineralógica de estos suelos incluye cuarzo, caolinita, feldespato y otros minerales que, al descomponerse, aportan nutrientes, aunque en cantidades insuficientes para considerarlos altamente fértiles. (Instituto Geográfico Agustín Codazzi, 2011). En el siguiente mapa se presenta las unidades del suelo en el río Quito.

En los suelos de planicie aluvial caracterizados por texturas finas y drenaje imperfecto a pobre se favorece la retención y acumulación de metales pesados, lo que los hace un factor de vulnerabilidad. Los depósitos de arcillas y limos en los planos de inundación y terrazas actúan como sumideros naturales, adsorbiendo metales como Hg, Pb y Cd, lo que prolonga su persistencia en el ambiente. La dinámica fluvial y la sedimentación reciente redistribuyen estos contaminantes, incrementando su movilidad en la cuenca. En suelos más arenosos y bien drenados de las zonas de lomerío y montaña estructural, la menor capacidad de retención facilita el lixiviado de metales pesados hacia los tributarios del río Quito. Por su parte, la acidez puede intensificar la movilidad y biodisponibilidad de estos metales, incrementando su toxicidad y

potencial impacto sobre la biota y las comunidades locales (Dragović; Mihailović; Gajić, 2008; Kicińska; Pomykała; Izquierdo-Díaz, 2022).

Mapa 17. Unidades de suelos en la cuenca del río Quito



Fuente: Elaboración propia (2025)

- **Red hídrica de la cuenca**

El área total de captación de la cuenca hidrográfica del río Quito corresponde aproximadamente a 166,548 hectáreas, estas incluyen seis municipios: Río Quito (Paimadó cabecera municipal), El Cantón del San Pablo (cabecera municipal Managrú), Istmina, Unión Panamericana (cabecera municipal - Las Ánimas), Cértegui y Atrato (cabecera municipal Yuto). El río Quito posee una longitud de 95 km y constituye la corriente principal que surca el territorio del municipio del mismo nombre. Nace en Ibordó al oriente, donde inicia como el río Cértegui, cerca al límite municipal de Cértegui y Unión Panamericana. Hacia el sur tiene otro afluente principal formado por el río San Pablo y la quebrada Peradó. Otra fuente hídrica importante que recorre el municipio de occidente a oriente es el río Pató, quien a su vez recibe las aguas de corrientes menores como las quebradas: La Culebra, Julia, Quijarada, Jerichó, Campo Santo, Churuguara, Chiguarandó, Predeperico, Pato, Chachuro, Chirichiri, Jengadó, Venerita, Chibiquide, Cumbasado, entre otras. Este río y la mayoría de sus afluentes nacen en el cerro de Chachajo en las estribaciones de la serranía del Baudó. La confluencia del río Pató con el río Quito se realiza a la altura de la población de Villa Conto, una de las más pobladas de la cuenca. El Mapa 18 presenta la distribución de la red hídrica en la cuenca del río Quito.

LOCALIZACIÓN

Map showing the location of the study area in Colombia, within the Pacific region, near the border with Ecuador and Venezuela. The map includes labels for neighboring countries and the Pacific Ocean.

LEYENDA

- Centros Poblados Cuenca
- Consejo Comunitario de la Comunidad Negra del Corregimiento de la Soledad
- Consejo Comunitario Comunidad Negra de San Isidro
- Consejo Comunitario Comunidad Negra de Villa Santa
- Consejo Comunitario Integral De Lloro, Cocullo
- Consejo Comunitario Mayor De La Organización Campesina Popular Del Alto Atlatzo - Cocomepoca
- Consejo Comunitario Mayor Del Alto San Juan "Asoacasán"
- Consejo Comunitario Mayor Del Cantón De San Pablo "Aciensas"
- Consejo Comunitario Mayor Del Medio Atlatzo - Aciá
- Consejo Comunitario Mayor Unión Panamericana "Cocomapa"
- Consejo Comunitario Mayor de Istmina Y Parte Del Medio San Juan
- Consejo Comunitario Santo Domingo
- Consejo Comunitario de Cértegui
- Consejo Comunitario de Palmado
- Consejo Comunitario de la Comunidad Negra de La Molana
- Consejo Comunitario general del Río Baudó y sus afluentes - Acoba

Cuenca Hidrográfica del Río Quito

Convenções

- Drenajes
- Limite Municipal

Detailed map of the study area showing the Río Quito watershed and its various communities. The map includes labels for communities like Río Quito (Palmado), Cértegui, Unión Panamericana, Istmina, and El Cantón del San Pablo. It also shows the Río Atrato and Río Baudó.

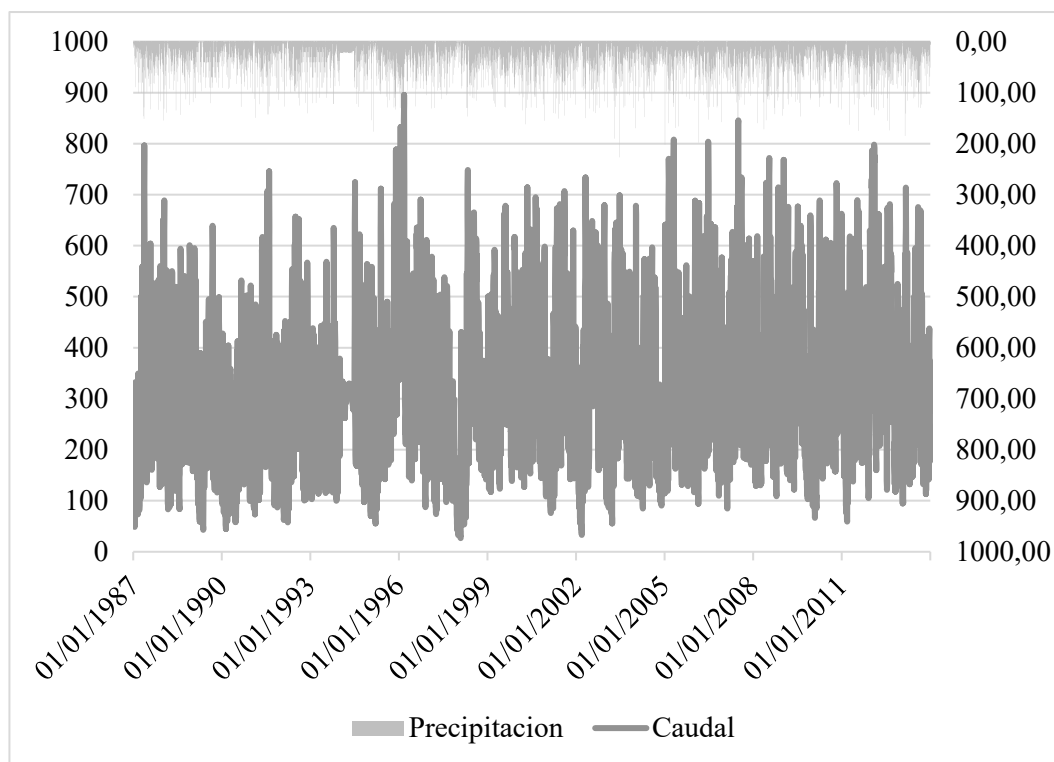
Escala: 1: 350.000

1,8 3,5 7 10,5 14 17,5km

Para analizar la hidrología del río Quito, mediante el software HEC-HMS, se generó un modelo hidrológico que permitió estimar la serie histórica de caudales utilizando los datos observados en la estación San Isidro, ubicada cerca a la desembocadura del río Quito en el río Atrato, a la altura del centro poblado del mismo nombre. La serie sintética de caudales permitió obtener caudales máximos y mínimos anuales que son coherentes con el registro de máximos y mínimos anuales observados en la estación San Isidro, la cual dejó de funcionar en el año 2013.

La ausencia de datos obligó a las estimaciones mediante el modelo hidrológico para fines de planificación y gestión integral del recurso hídrico. En la Figura 17 se presenta la serie histórica de caudales estimada desde el año 1987 al 2013.

Figura 17. Serie histórica de caudales simulados



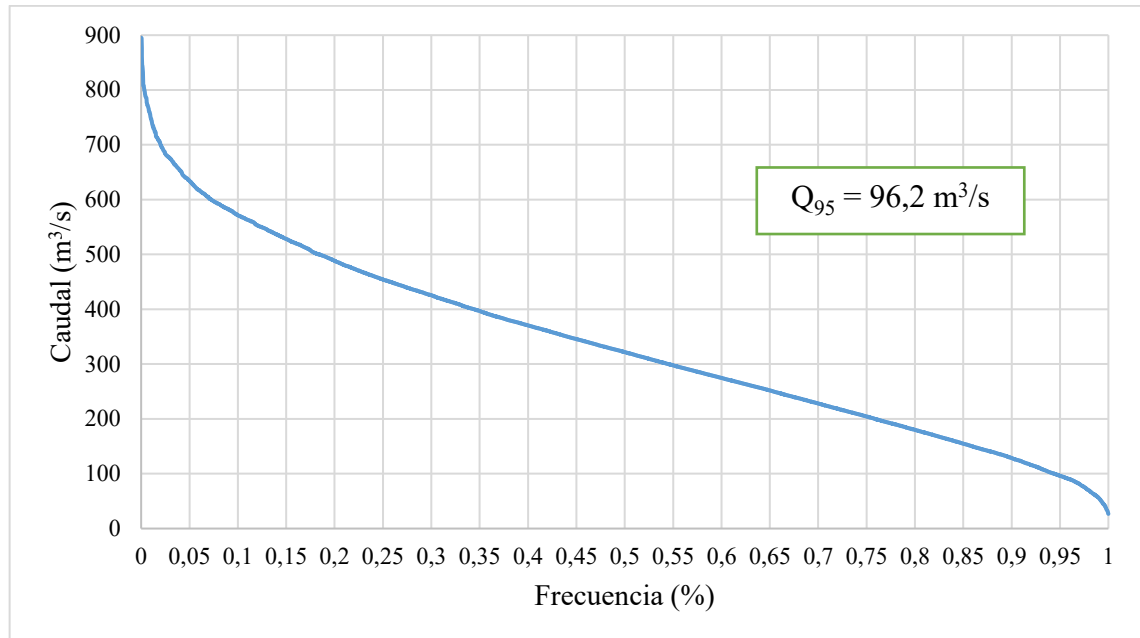
Fuente: Fondo Colombia en Paz, Universidad de Córdoba y Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible (2023)

La interacción entre la cobertura vegetal, los tipos de suelos y el régimen de precipitación permiten que el cauce del río Quito cuente con un caudal constante a lo largo del año, los caudales más bajos coinciden con los periodos de menor precipitación principalmente entre los meses de enero a marzo. Los caudales promedios mensuales varían entre 264,1 y 391,4 m^3/s .

Con la serie histórica de caudales simulados se estimó el caudal ambiental, definido como la cantidad del régimen de flujo original de un río que debe seguir fluyendo aguas abajo y hacia sus llanuras aluviales para mantener características específicas y valiosas del ecosistema (THARME, 2002). Como estimación del caudal ambiental se utilizó el Q_{95} calculado mediante la curva de permanencia del río Quito (Elhatip; Hinis, 2015; Karimi et al., 2021; Ravindra et al., 2017); el Q_{95} es el caudal que es superado o igualado el 95% del tiempo. La curva de permanencia (Figura 18) del río Quito indicó que un caudal de 96,2 m^3/s es necesario para

mantener las condiciones naturales del ecosistema en río Quito, este caudal permitiría preservar y mantener el ecosistema acuático y los procesos ecológicos y biológicos que en él se presentan.

Figura 18. Curva de permanencia del río Quito



Fuente: Fondo Colombia en Paz, Universidad de Córdoba y Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible (2023)

El análisis hidrológico identificó que los caudales promedios mensuales son el doble del valor del caudal ambiental estimado, es decir, bajo condiciones naturales la cuenca del río Quito es capaz de mantener su caudal ambiental, no obstante, la actividad minera en el cauce ha alterado la dinámica del flujo en la cuenca. En los tramos alterados por la maquinaria se acumulan los sedimentos arrastrados por el río y el cauce pierde la capacidad para transportar el caudal generado, estos tramos estarían funcionando como embalses que atenúan los caudales que se presentan aguas abajo. Bajo las condiciones actuales donde la deforestación y la modificación indiscriminada del cauce son impactos ambientales relevantes y persistentes en el tiempo, se afecta la capacidad del río Quito de mantener las condiciones ecológicas adecuadas para el ecosistema acuático en la cuenca.

A continuación, se presentan los caudales máximos y mínimos anuales generados por el modelo hidrológico calibrado y validado, los cuales cumplen con todas las pruebas estadísticas requeridas para su definición.

Tabla 29. Caudales máximos y mínimos para diferentes periodos de retorno en el río Quito

Probabilidad (%)	Periodo de retorno (año)	Caudal máximo (m ³ /s)	Caudal mínimo (m ³ /s)
0,500	2	732,340	76,920
0,200	5	794,850	54,290
0,100	10	823,020	42,460
0,067	15	835,960	36,620
0,050	20	844,350	32,690
0,020	50	866,550	21,690
0,010	100	880,410	14,360

Fuente: Fondo Colombia en Paz, Universidad de Córdoba y Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible (2023)

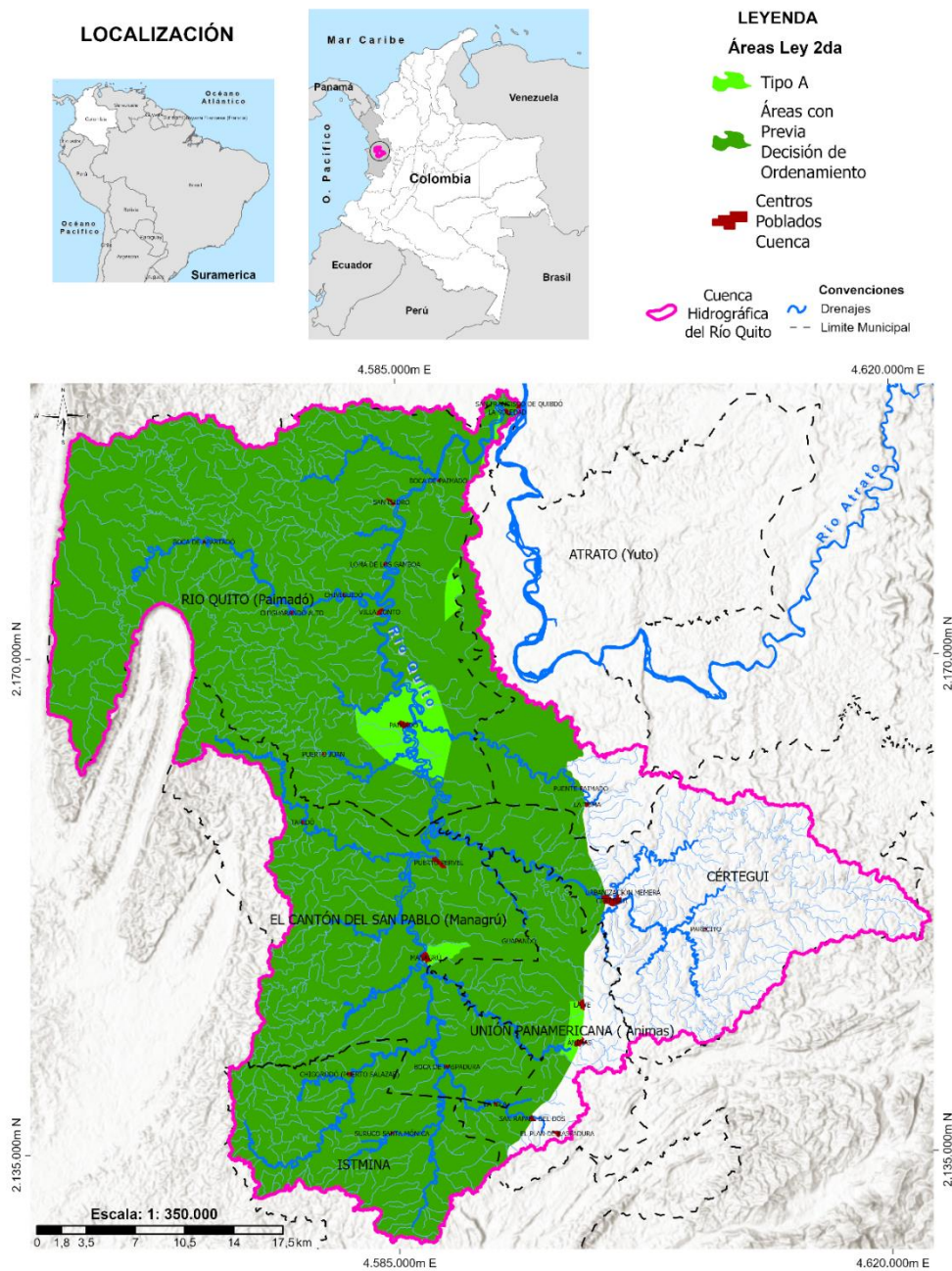
- **Zonas de importancia ecológica y servicios ecosistémicos**

La minería ha alcanzado áreas sensibles desde el punto de vista ecológico e hidrológico, incluyendo zonas protegidas o de importancia ambiental como la cuenca del río Quito. De acuerdo con el World Resources Institute, a nivel global, el 75 % de las minas activas y áreas de exploración se superponen con zonas de alto valor de conservación y cuencas con estrés hídrico. Además, más del 25 % de estas actividades mineras se encuentran dentro de un radio de 10 km de un área estrictamente protegida, y aproximadamente un tercio de las minas y sitios de exploración están ubicados en ecosistemas de alto valor en cuanto a su conservación. Esto evidencia un aumento en la vulnerabilidad de zonas de importancia ambiental afectadas por los impactos derivados de la minería y pone en peligro los servicios ecosistémicos esenciales para la sostenibilidad ambiental y el bienestar humano (Armendáriz-Villegas et al., 2015; World Resources Institute, 2004).

Más del 70 % de la cuenca del río Quito está clasificada como área de reserva según la Ley Segunda de 1959, la cual establece su destinación para el desarrollo de la economía forestal y la protección de los suelos, las aguas y la vida silvestre. Aunque esta categoría no la define como un área protegida, sí impone restricciones para el uso del suelo en actividades industriales. No obstante, a pesar de la existencia de esta normativa y del requisito legal de solicitar la sustracción de áreas de reserva ante la autoridad ambiental para la implementación de actividades como la minería, se evidencia una incoherencia en su aplicación, ya que la minería ilegal avanza sin restricciones a lo largo del cauce del río Quito y sus tributarios. En el Mapa

19 se representa la distribución de las zonas de reserva establecidas en la Ley 2 de 1959 dentro de la cuenca del río Quito.

Mapa 19. Áreas de la cuenca del río Quito dentro de la reserva establecida en la Ley 2 de 1959



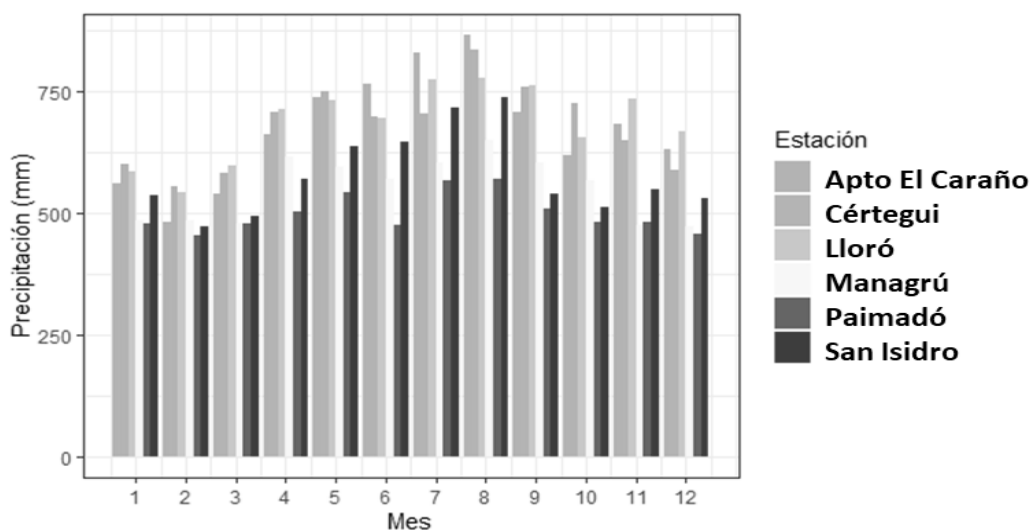
Fuente: Elaboración propia (2025)

- **Condiciones climáticas**

- i. **Precipitación**

La figura del promedio multianual de precipitación mensual acumulada en el río Quito muestra que el valor mensual varía entre 500 mm y 750 mm. Las estaciones Cértegui, aeropuerto “El Caraño” (Ubicada en Quibdó) y Lloró son las de mayor volumen de lluvia, estando por encima de las demás estaciones entre 50 mm y 100 mm, mientras que las estaciones Paimadó, Managrú (Cuenca media y alta) son las que presenta los menores volúmenes. Si bien las lluvias son muy uniformes a lo largo del año, con una tendencia monomodal, se puede destacar el mes de agosto como el más lluvioso, mientras que el periodo de enero a marzo es el menos lluvioso.

Figura 19. Precipitación mensual acumulada multianual



Fuente: Fondo Colombia en Paz, Universidad de Córdoba y Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible (2023)

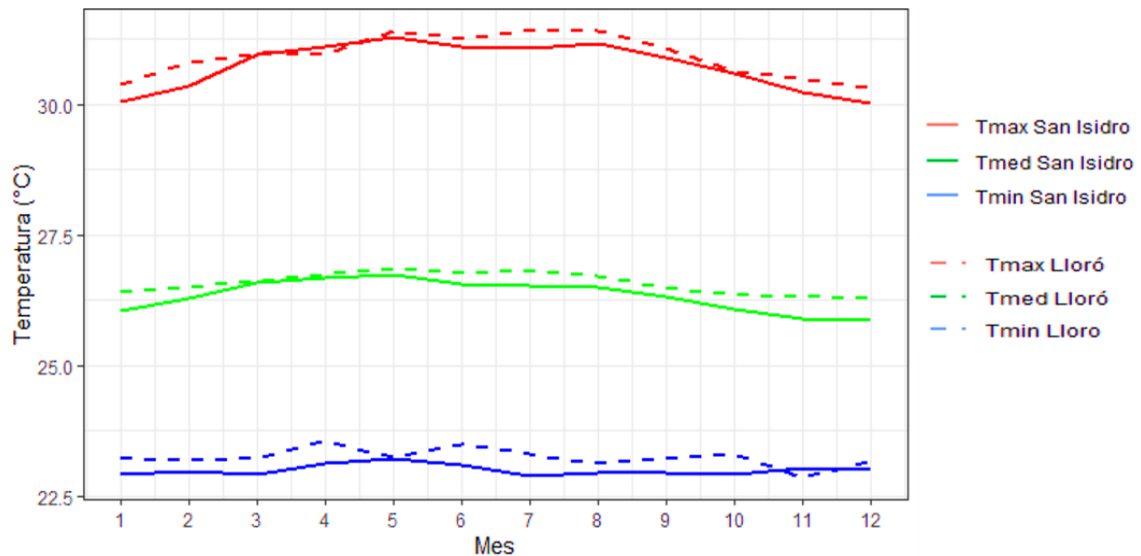
Por otro lado, los datos totales anuales muestran rangos oscilantes entre 6000 mm y un poco más de 8000 mm, lo cual es coherente para una de las zonas más lluviosas del planeta. El comportamiento entre estaciones es muy similar en el descrito en el nivel mensual.

- ii. **Temperatura**

La figura de los promedios mensuales multianuales de las temperaturas medias, máximas y mínimas indica que, tanto en Lloró como en Paimadó, la temperatura mínima oscila alrededor de los 23°C, la temperatura media alrededor de los 26°C y la máxima entre 30°C y 32°C, lo cual es muy cercano al comportamiento del departamento del Chocó reportado por el IDEAM (IDEAM, [S.d.]). Las gráficas indican que, aunque el comportamiento es muy

uniforme a lo largo del año, se puede resaltar que los meses de diciembre y enero son los de temperaturas más bajas, mientras que de mayo a julio se presenta la temperatura más alta.

Figura 20. Promedio mensual multianual de temperaturas

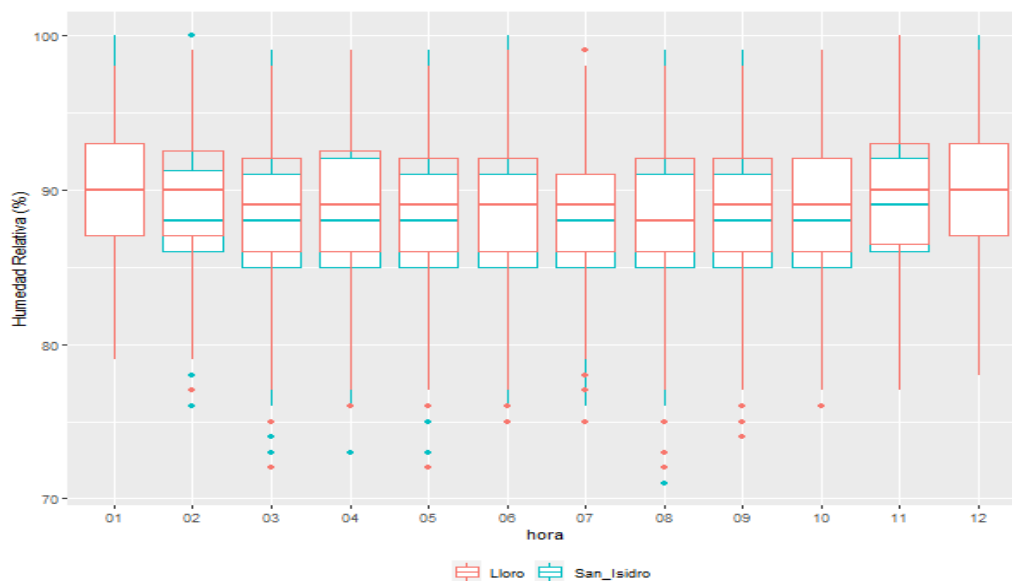


Fuente: Fondo Colombia en Paz, Universidad de Córdoba y Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible (2023)

iii. Humedad relativa

Las figuras de boxplot para las dos estaciones de humedad relativa muestran que el comportamiento es muy similar entre las dos estaciones, aunque en Lloró se presentan valores más altos en casi todos los meses. El valor promedio de humedad relativa está cercano al 90%, valor que se presenta en gran parte del departamento de Chocó según el IDEAM (IDEAM, [S.d.]), sin embargo se presentan algunos valores poco frecuentes que pueden estar entre 70% y 80%. A pesar de que el comportamiento a lo largo del año es muy similar en todos los meses, se puede resaltar que en los meses de enero y diciembre se presentan los valores más altos de esta variable.

Figura 21. Boxplot de humedad relativa diaria por meses en río Quito



Fuente: Fondo Colombia en Paz, Universidad de Córdoba y Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible (2023)

La alta pluviosidad en la cuenca del río Quito, con precipitaciones anuales que superan los 7.000 mm en algunas zonas, favorece el arrastre y dispersión de metales pesados provenientes de actividades mineras hacia los cuerpos de agua. La respuesta rápida del caudal a los eventos de lluvia, con incrementos significativos en cuestión de días, intensifica la movilización de sedimentos contaminados, aumentando la exposición de los ecosistemas acuáticos y comunidades locales a estos elementos tóxicos. Además, la erosión de las orillas causada por la escorrentía incrementa la liberación de partículas contaminadas al río, afectando la calidad del agua y los suelos ribereños (Correa-Caselles; Camacho; Fernandez, 2025; Marrugo-Negrete et al., 2023a).

La variabilidad climática extrema en la cuenca del río Quito, influenciada por el fenómeno ENSO, agrava la contaminación por metales pesados. Durante El Niño, la disminución de caudales puede generar una mayor concentración de metales en los sedimentos expuestos, aumentando su toxicidad para la biota acuática. En contraste, las lluvias intensas de La Niña incrementan la lixiviación de contaminantes desde los suelos hacia los cuerpos de agua, ampliando su distribución en la cuenca.

- **Procesos de erosión, sedimentación y acumulación de arenas**

La erosión y sedimentación representan un factor de vulnerabilidad asociado a la alteración de la geomorfología fluvial como consecuencia de la minería ilegal en el río Quito. Sobre el cauce principal del río se evidenció la ausencia de vegetación riparia protectora, la cual, aunada a la inestabilidad hidráulica del río debido a la apertura de canales y el dragado de minería ilegal, condiciona la vulnerabilidad de la cuenca ante la contaminación por metales pesados.

La alta carga de sedimentos en suspensión y la acumulación de bancos de arena generan condiciones que facilitan la adsorción y transporte de metales pesados a lo largo del sistema fluvial (Marrugo-Negrete et al., 2023a, 2023b). La dinámica del cauce, caracterizada por la migración continua y la formación de canales secundarios antrópicos, favorece la redistribución de estos contaminantes, aumentando su dispersión en el agua y su deposición en los sedimentos del fondo. Además, la pérdida de un canal principal bien definido a favor de un flujo difuso disminuye la capacidad de autodepuración del río, permitiendo que los metales pesados se acumulen en zonas de baja energía, donde pueden permanecer disponibles para la biota y los ecosistemas acuáticos por periodos prolongados.

- **Condiciones de pobreza**

La cuenca del río Quito está compuesta por los municipios de Atrato, El Cantón del San Pablo, Cértegui, Unión Panamericana, Istmina y Río Quito. La economía de esta región está basada principalmente en la explotación del oro y el platino y en el aprovechamiento forestal para la comercialización de madera y en algunas zonas menos extensas la agricultura (Otálvaro-Marín; Parra-López; Klinger-Cundumí, 2023).

Debido a los conflictos políticos, sociales y económicos presentados en la región del Chocó biogeográfico explicados en el capítulo de contextualización de la tesis, la forma de extracción de minerales del río Quito en su mayoría es ilegal, toda vez que no cuenta con las autorizaciones, seguimientos y requerimientos establecidos en la legislación del sector minero y ambiental. Por tanto, la predominancia de la minería de oro en la cuenca conlleva a la devastación ambiental y a la precarización de las condiciones de vida de las poblaciones afectadas, violando sus derechos a la vida, a la salud, a una vivienda digna, a la propiedad, la alimentación, al trabajo y a gozar de un ambiente sano. Además, se considera, que socava los derechos a la participación, a la protesta y a la libertad de expresión, de reunión y asociación, contribuyendo al aumento de su vulnerabilidad (Palacios, 2022).

Los altos índices de pobreza en los municipios de la cuenca del río Quito se reflejan en múltiples necesidades insatisfechas y un bajo nivel de desarrollo económico, social y cultural. La población enfrenta un déficit de viviendas, condiciones precarias de saneamiento y servicios públicos de baja cobertura y calidad. Además, la falta de inversión pública y los problemas de gobernabilidad, agravados por la corrupción y la ineficiencia administrativa, han perpetuado el rezago en la región.

La limitada conectividad también representa un obstáculo para el desarrollo local. Durante las épocas de sequía, la sedimentación y el bajo caudal del río dificultan el transporte fluvial, restringiendo el acceso a bienes y servicios. Asimismo, la falta de empleo y las deficiencias en salud y educación afectan significativamente la calidad de vida de la población (Jimenez-Ortega et al., 2020).

De acuerdo con el Índice de Necesidades Básicas Insatisfechas (INBI) del Departamento Administrativo Nacional de Estadística (DANE) el 65,51 % de los habitantes del departamento de Chocó están en condiciones de pobreza. Para el caso de los municipios de la cuenca del río Quito, el INBI, presenta los siguientes porcentajes: Istmina; 83,96%, Río Quito; 58,34%, Unión Panamericana; 52,15%, Cértegui; 51,74%, El Cantón de San Pablo; 43,52% y Atrato; 42,5%; evidenciando la crisis económica y social que permea esta cuenca. De hecho, al observar el panorama general de municipios de Colombia, entre los 1123 municipios del País, Istmina es el onceavo más pobre (Departamento Administrativo Nacional de Estadística, 2022). Las condiciones de pobreza de las comunidades de esta cuenca limitan su resiliencia y aumentan la vulnerabilidad frente a la contaminación por metales pesados derivados de la actividad minera.

- **Dependencia del recurso hídrico contaminado**

La relación entre las comunidades afro del Atrato y del río Quito con el agua es profunda y estructural, marcando cada aspecto de su vida social, económica y cultural. Sus viviendas se asientan a orillas del río, que no solo es su principal vía de comunicación, sino también el eje de sus actividades productivas, desde la pesca hasta la minería. El río es un espacio de esparcimiento infantil, un lugar de trabajo para las mujeres y el escenario donde se desarrollan los ciclos esenciales de la vida: la familia, la salud, la muerte y la organización territorial. Esta conexión no es solo simbólica, sino vital; el río no es un recurso externo a la comunidad, sino una extensión de su existencia.

Sin embargo, esta interdependencia también representa una condición de vulnerabilidad para la comunidad. La contaminación del río por mercurio y sedimentos derivados de la minería ilegal afecta directamente su ecosistema y la salud de la población que depende de sus aguas para el consumo, la pesca y otras actividades diarias. Además, la alteración del cauce, las restricciones de movilidad impuestas por grupos armados y la falta de políticas de protección adecuadas agravan la situación, limitando el acceso a recursos y servicios esenciales. Estas problemáticas ponen en riesgo la sostenibilidad del territorio y las condiciones de vida de sus habitantes, afectando su bienestar y desarrollo a largo plazo.

- **Desigualdad en el acceso a la información**

La falta de acceso a datos científicos y técnicos sobre los efectos de la minería impide que la población tome decisiones informadas sobre su salud y la gestión de su territorio. A pesar de los esfuerzos de organizaciones sociales para fortalecer la autonomía territorial, los procesos de decisión sobre la explotación minera y la protección ambiental suelen excluir a las comunidades locales. Como resultado, la ausencia de información confiable refuerza la dependencia de fuentes externas y las deja en una posición de desventaja frente a las actividades extractivas que degradan su entorno (García Sánchez, 2022).

Además, las deficiencias en la educación formal han dificultado la sensibilización sobre los efectos del mercurio y otros metales pesados liberados al ecosistema. Sin conocimientos suficientes sobre la toxicidad de estos compuestos, las comunidades no pueden exigir de manera efectiva medidas de mitigación ni adoptar estrategias para reducir la exposición a la contaminación. Esta falta de información también impide el desarrollo de una cultura de prevención que permita identificar síntomas tempranos de intoxicación, lo que contribuye a que los impactos en la salud se manifiesten de manera más grave y prolongada en el tiempo. La exclusión informativa, por tanto, no solo perpetúa la crisis ambiental en la región, sino que también limita las posibilidades de las comunidades para exigir justicia ambiental y sanitaria.

- **Alimentación insuficiente**

La nutrición deficiente favorece la absorción de metales pesados en el organismo. La contaminación del agua y del suelo afecta la pesca y la agricultura, reduciendo la disponibilidad y calidad de los alimentos esenciales para la comunidad. A medida que las fuentes tradicionales de sustento se deterioran, la población enfrenta una crisis alimentaria que agrava los problemas de desnutrición, debilitando sus sistemas inmunológicos y haciéndolos más susceptibles a

enfermedades derivadas de la exposición a estos contaminantes. La escasez de alimentos nutritivos impide que los organismos reciban minerales esenciales como calcio, hierro y zinc, lo que hace que el cuerpo asimile más fácilmente metales tóxicos como el plomo y el mercurio.

Esta situación es especialmente grave en niños y mujeres embarazadas, quienes requieren una dieta equilibrada para su desarrollo y salud. La malnutrición combinada con la exposición a metales pesados puede provocar problemas neurológicos, retrasos en el crecimiento y enfermedades congénitas, perpetuando ciclos de pobreza y deterioro de la calidad de vida. La falta de acceso a una alimentación adecuada no solo compromete el bienestar físico de las comunidades, sino que también limita sus capacidades cognitivas y su potencial de desarrollo. En este contexto, la desnutrición que para el departamento del Chocó es de las más altas a nivel nacional, representa un factor que impone vulnerabilidad ante la contaminación por metales pesados para la cuenca hidrográfica (Asprilla-Córdoba; Montenegro-Martínez, 2022).

7.3. CONSIDERACIONES FINALES

La amenaza de contaminación por metales pesados en la cuenca del río Quito está determinada principalmente por la presencia de minería aluvial ilegal, que ha generado vertimientos de residuos con trazas de mercurio, plomo, y otros metales tóxicos en el agua superficial que se acumulan en los sedimentos. La actividad minera no solo introduce contaminantes directamente al sistema fluvial, sino que también altera la dinámica hidráulica y la geomorfología fluvial del río, ocasionando la resuspensión y dispersión de estos elementos a lo largo de la cuenca. Además, la deforestación causada por la minería ha eliminado la vegetación riparia, reduciendo la capacidad del ecosistema para filtrar y retener contaminantes, lo que agrava la magnitud y extensión geográfica de la amenaza.

Por su parte, la formación de bancos de arena y la modificación del cauce por la minería han generado cambios en los patrones de flujo, afectando la capacidad del río para transportar y diluir contaminantes. En particular, el aumento en la sedimentación y la pérdida de un canal principal bien definido han contribuido a la acumulación de metales pesados en sectores de baja velocidad, favoreciendo su concentración y potencial biodisponibilidad en el ecosistema acuático. De esta manera, la interacción entre factores antrópicos y naturales amplifica la probabilidad de que la contaminación supere niveles críticos, convirtiendo la amenaza en un problema continuo y de gran impacto social, ambiental y económico.

En cuanto a la vulnerabilidad, la dependencia de la comunidad sobre el recurso hídrico contaminado es uno de los factores más críticos. Las poblaciones ribereñas utilizan el agua del río para consumo, actividades domésticas, pesca y transporte, lo que incrementa su exposición directa a los metales pesados. La falta de acceso a fuentes alternativas de agua potable y la precariedad en los servicios de saneamiento y salud agravan esta situación, ya que impiden la implementación de medidas de mitigación efectivas para reducir los riesgos en la población. Además, las condiciones de pobreza y la desigualdad en el acceso a información dificultan la adopción de estrategias de adaptación, lo que incrementa la sensibilidad de la comunidad ante los efectos adversos de la contaminación.

Por otro lado, las características físicas del territorio también condicionan la vulnerabilidad de la cuenca. La elevada erosión y sedimentación, combinadas con una alta pluviosidad, facilitan la movilización de metales pesados desde las áreas mineras hacia el sistema fluvial, incrementando su impacto sobre los ecosistemas y la población. La presencia de suelos con alta capacidad de retención de contaminantes en las planicies de inundación agrava la acumulación de metales pesados en sedimentos, prolongando su persistencia y afectando la calidad del agua a largo plazo. Estos factores, junto con la baja capacidad institucional para gestionar los impactos de la minería ilegal, limitan la capacidad de adaptación del sistema socioambiental e incrementan su vulnerabilidad.

La combinación de una amenaza constante y de alta intensidad con una vulnerabilidad socioambiental significativa genera un escenario de riesgo elevado en la cuenca del río Quito. La minería ilegal no solo representa la principal fuente de contaminación, sino que también modifica la estructura del ecosistema y las dinámicas socioeconómicas, amplificando los impactos negativos en la población.

8. CAPÍTULO 4. ESTRUCTURA SISTEMICA PARA EL FORTALECIMIENTO DE LOS INSTRUMENTOS DE GESTIÓN DE RIESGOS SOCIOAMBIENTALES ASOCIADOS A LA CONTAMINACIÓN DEL AGUA POR METALES PESADOS EN LA CUENCA DEL RÍO QUITO.

En este capítulo confluyen los hallazgos de los tres capítulos previos, con el objetivo de generar conocimiento que aporte a la gestión integral de riesgos socioambientales en cuencas impactadas por actividades de minería ilegal, tanto en Colombia, como en otros contextos con condiciones similares a nivel global. A partir del análisis de las relaciones conceptuales entre

amenaza, vulnerabilidad y riesgo, así como de la identificación de herramientas y la categorización de aspectos socioambientales obtenidos mediante la revisión bibliográfica sistemática, se estableció la base conceptual para el diseño de una estructura sistémica para el análisis de los factores del riesgo. Esta estructura buscó integrar de manera coherente los aspectos que configuran la amenaza derivada de la contaminación por metales pesados en el río Quito, así como las condiciones de vulnerabilidad de su cuenca hidrográfica frente a dicha problemática.

La construcción de esta estructura se considera un acercamiento hacia la gestión integral del riesgo socioambiental, cambiando orientaciones puntuales y estandarizadas que han limitado la efectividad de las estrategias de intervención en territorios caracterizados por dinámicas sociales complejas como es el caso de esta cuenca. En lugar de analizar de forma aislada los componentes del riesgo, la estructura sistémica propuesta permite organizar, jerarquizar e interrelacionar los aspectos identificados, facilitando la comprensión de los factores críticos involucrados y revelando vacíos y relaciones causales relevantes. Esta articulación es esencial para orientar con mayor precisión los procesos de toma de decisiones, mediante el uso de instrumentos de planificación más adecuados, contextualizados y ajustados a las realidades territoriales. Además, proporciona un marco replicable que puede adaptarse a otros sistemas hidrográficos afectados por dinámicas socioambientales similares (Begum et al., 2022; Linkov et al., 2006).

La necesidad de diseñar una estructura sistémica específica para la cuenca del río Quito se fundamenta en la complejidad y particularidad de los factores que inciden tanto en su amenaza como en su vulnerabilidad (Marrugo-Negrete et al., 2023a). Tal como se evidenció en el capítulo anterior, el riesgo asociado a la contaminación por metales pesados está condicionado no solo por la actividad minera ilegal, sino también por una serie de elementos físicos, ecológicos y sociales interdependientes de la minería y otras actividades antrópicas. Entre ellos se destacan la alteración del sistema fluvial, la geoacumulación diferencial de contaminantes, la precariedad en el acceso a servicios básicos y la degradación progresiva de los ecosistemas. Esta configuración multidimensional exige una lectura integral del territorio que reconozca las sinergias entre los procesos de degradación ambiental y las condiciones estructurales de la vulnerabilidad (Fondo Colombia en Paz; Universidad de Córdoba; Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible, 2023; Melo-Ascencio, 2024).

En este contexto, se espera que la estructura sistémica considere aspectos clave de la gestión integral del riesgo derivado de la contaminación por metales pesados en río Quito, como: la distribución espacial de los metales pesados en agua y sedimentos; las alteraciones geomorfológicas inducidas por la minería, incluyendo bancos de arena, pozas mineras y pérdida de canal principal; los patrones de uso del suelo y la pérdida de cobertura boscosa; las características hidroclimáticas propias de la región, marcadas por alta pluviosidad y escorrentía; la configuración socioeconómica de las comunidades, caracterizada por pobreza estructural y dependencia directa del recurso hídrico y el conjunto de actores institucionales y comunitarios, incluyendo su nivel de participación, capacidad de respuesta y vinculación con procesos de gobernanza ambiental (Universidad de Córdoba; Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible; Fondo Colombia en Paz, 2023). En este sentido los aspectos socioambientales identificados deberán interrelacionarse para determinar su influencia y dependencia y proponer la estructura sistémica. La integración de estos elementos permitirá avanzar hacia estrategias de intervención más sostenibles, adaptativas y equitativas, no solo para la cuenca del río Quito, sino también para otros territorios expuestos y afectados por la minería aluvial de oro.

8.1.PROCEDIMIENTOS METODOLÓGICOS

Para la construcción de la estructura sistémica se utilizó como insumo principal el listado de 58 aspectos socioambientales identificados mediante la Revisión Bibliográfica Sistemática. No obstante, debido a la amplitud de este conjunto y la complejidad que posee el área de estudio, se consideró necesario realizar un ejercicio de priorización que permitiera seleccionar aquellos aspectos con mayor pertinencia y aplicabilidad en el contexto de la cuenca. Para ello, se adoptó la metodología de validación conocida como 3S (Self, Science and Social validation), la cual ha sido empleada en procesos de validación de indicadores ambientales por su capacidad de incrementar progresivamente la confiabilidad de los resultados mediante un enfoque complementario en tres etapas sucesivas (Cloquell-Ballester et al., 2006; Dictoro; Yuri Hanai, 2023). En este caso se utilizaron únicamente las dos primeras etapas de validación que plantea esta metodología, toda vez que la estructura que se plantea posee un alcance conceptual y no puede ser validada por posibles usuarios.

La primera etapa, denominada autovalidación (*self-validation*), consistió en una reflexión crítica propia del equipo investigador, constituido en este caso por el director, codirector y doctorando. Esta fase se planteó de manera continua, con una revisión inicial de los 58 aspectos, y revisiones posteriores en cada etapa de validación, para detectar posibles

inconsistencias o redundancias en los aspectos formulados. La segunda etapa correspondió a la validación científica (*science validation*), en la cual los aspectos fueron evaluados por especialistas con formación mínima de maestría y conocimiento sobre el tema de investigación y/o del área de estudio. Los expertos evaluaron cada aspecto de acuerdo con la escala Likert que va desde 1, cuando hay incumplimiento del criterio, hasta 4 cuando hay cumplimiento del criterio (Likert, 1932), finalmente se aplicó el método de borda para definir el ranking de prioridad. Este método es una técnica de votación diseñada para establecer un ranking entre múltiples alternativas basándose en la acumulación de puntos asignados por un grupo de evaluadores, el total de puntos de cada alternativa determinó su posición jerárquica (Radulescu; Radulescu; Boncea, 2022). Los criterios definidos por el grupo de investigación fueron los siguientes:

- **Relevancia del aspecto:** este criterio evalúa la importancia y pertinencia del aspecto socioambiental en relación con la problemática específica de la contaminación por metales pesados. Consiste en determinar hasta qué punto el aspecto analizado tiene un impacto directo o indirecto sobre la amenaza o la vulnerabilidad asociada a la contaminación por metales pesados en la cuenca del río Quito.
- **Dependencia del aspecto:** este criterio se refiere al grado en que el aspecto socio ambiental está condicionado por factores externos o interactúa con otras variables dentro del sistema socio ecológico. Evalúa la sensibilidad del aspecto frente a cambios en las dinámicas ambientales, sociales, económicas o institucionales, lo que permite identificar aquellos elementos cuya variabilidad puede influir significativamente en la estructura sistémica.
- **Integralidad del aspecto:** este criterio examina la capacidad del aspecto para reflejar de manera holística las interrelaciones entre los componentes sociales, ambientales y económicos del territorio. Se buscó que los aspectos incluidos contribuyeran a una visión sistémica e integrada del riesgo, permitiendo representar la complejidad inherente al problema de la contaminación por metales pesados y facilitando un enfoque transversal en la toma de decisiones. Es posible que algunos aspectos integren otros de los mencionados en el listado, por tanto este criterio busca identificar esa característica.

Esta validación constituyó un insumo para el análisis prospectivo de relaciones de influencia y dependencia mediante la matriz de impactos cruzados desarrollada en MICMAC.

8.1.1. Análisis estructural mediante matriz de impactos cruzados

El análisis estructural basado en matrices de impactos cruzados que se hace mediante MICMAC es una técnica metodológica utilizada para identificar y jerarquizar las interrelaciones entre un conjunto de variables que componen un sistema complejo. A través de la construcción de una matriz de impactos cruzados, se evalúa de forma cualitativa-cuantitativa el grado de influencia directa que ejerce cada variable sobre las demás, así como su grado de dependencia frente al sistema. Posteriormente, mediante procesos de multiplicación matricial, se calculan los efectos indirectos, lo que permite identificar las variables clave que estructuran el sistema, clasificándolas según su nivel de influencia y dependencia (Ariyani; Fauzi, 2019).

La metodología MICMAC (*Matrice d'Impacts Croisés Multiplication Appliquée à un Classement*) fue introducida por Duperrin y Godet (1975) y desarrollada posteriormente por Godet (1979), quien la definió como una matriz de variables causales diseñada para describir las influencias cruzadas entre ellas (Madanian; Costa, 2017). MICMAC se utilizó para realizar un análisis estructural de los aspectos socioambientales de amenaza y vulnerabilidad asociados a la contaminación por metales pesados en la cuenca del río Quito, analizando las interrelaciones directas, indirectas y potenciales entre dichos factores. Se construyó una matriz de impactos cruzados de dimensión 45×45 con todos los aspectos relevantes identificados y, con ayuda del software MICMAC (desarrollado por el Instituto LIPSOR, Francia), se evaluó la intensidad de la relación entre cada par de variables.

Cada influencia se calificó siguiendo la escala propuesta por Godet: 0 cuando no existe efecto, 1 para efecto débil, 2 para efecto medio, 3 para efecto fuerte, y la letra “P” para indicar la presencia de una posible relación potencial en caso que aplique (Ariyani et al., 2022). Una vez completada la matriz de influencias directas (MID), se aplica una multiplicación matricial ($M \times M$) para calcular los impactos indirectos, lo que permite obtener una matriz global de influencias totales (directas + indirectas). Finalmente, MICMAC genera un mapa de influencia-dependencia a partir de la suma de filas (que indica la influencia ejercida por cada variable) y de columnas (que representa su grado de dependencia), lo cual permite visualizar y clasificar las variables según su rol estructural dentro del sistema (Nazlabadi et al., 2023).

El uso de MICMAC en la investigación fue fundamental para abordar de forma multidisciplinar y prospectiva la complejidad del sistema estudiado, identificando de manera sistemática cuáles son las variables estratégicas más influyentes y cuáles dependen en mayor

medida de las demás, la definición de puntuaciones para el desarrollo de la matriz de impactos cruzados tuvo en cuenta los resultados de la consulta a expertos realizada anteriormente. Este análisis MICMAC ayudó a revelar aspectos socioambientales que podrían tener una alta incidencia futura en el riesgo socioambiental pero que no eran evidentes inicialmente (Estuardo-Cevallos; Roldan-Ruenes; De Cuba, 2015).

8.1.2. Definición de tipos de variables

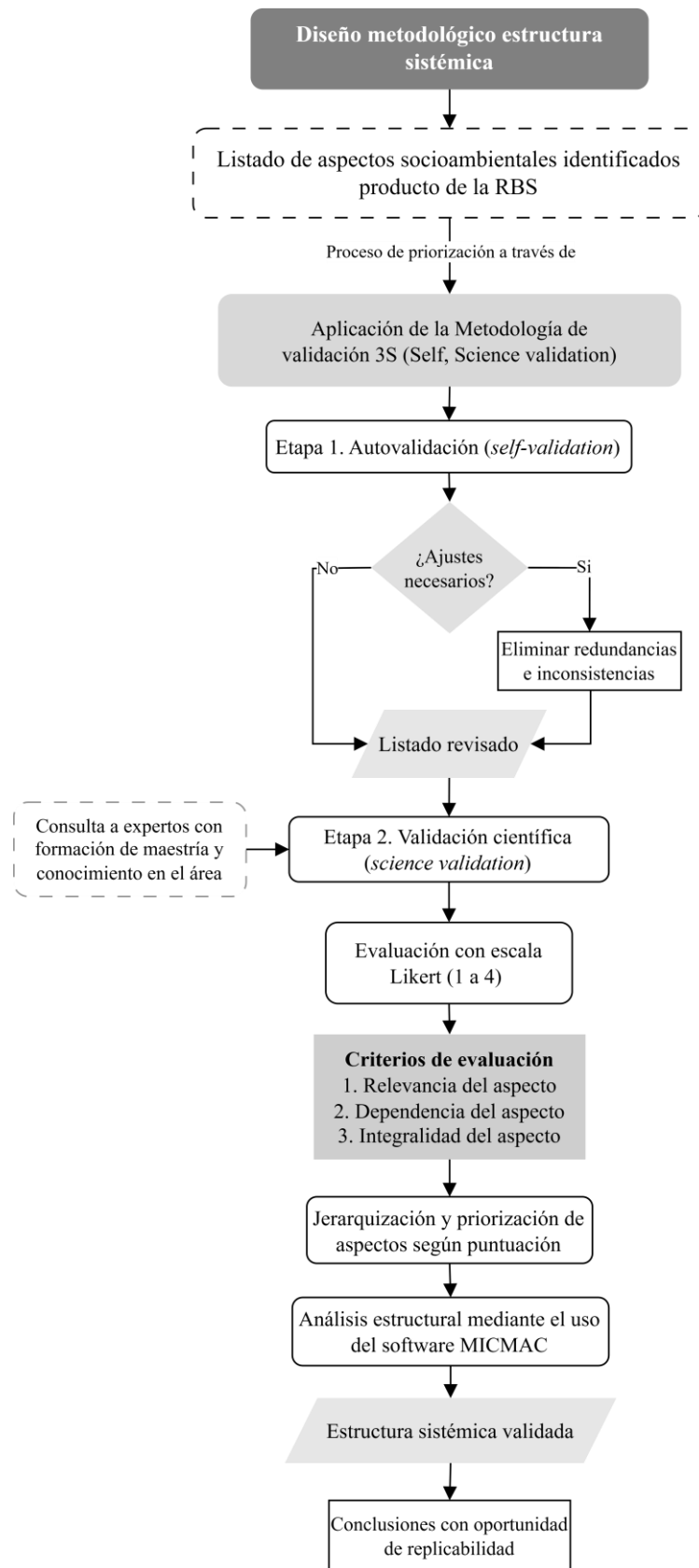
A partir del mapa de influencia y dependencia que genera MICMAC con los resultados de la matriz de impactos cruzados se pueden clasificar los aspectos socioambientales en tres tipos de variables de acuerdo con la ubicación de estas en el cuadrante del mapa: variables influyentes, variables influyentes pero poco dependientes, variables dependientes pero poco influyentes y variables poco influyentes y dependientes. Esta clasificación es fundamental para determinar cuáles son los aspectos socioambientales que definitivamente deben estar incluidos en la estructura sistémica que se va a proponer (Nazlabadi et al., 2023).

8.1.3. Construcción de la estructura sistémica

Para construir la estructura sistémica que oriente y direcciona de manera integral la gestión del riesgo socioambiental asociado a la contaminación por metales pesados en la cuenca del río Quito, se tomó como punto de partida el flujograma de relaciones etimológicas entre los conceptos de amenaza, vulnerabilidad y riesgo (figura 5) realizado en el Capítulo 1 de esta tesis doctoral. Este esquema representó las interacciones entre los factores de riesgo y sus componentes principales. A partir de esa base conceptual, se incorporaron las variables influyentes identificadas mediante el análisis estructural con MICMAC, lo que permitió configurar gráficamente una representación integrada de los aspectos socioambientales relevantes. Esta configuración representa la interacción y articulación entre los aspectos socioambientales de amenaza, vulnerabilidad y riesgo identificados como influyentes, con el propósito de constituir un insumo conceptual para el fortalecimiento de los instrumentos de gestión del riesgo socioambiental en cuencas impactadas por la minería ilegal y la contaminación por metales pesados, desde un enfoque multidimensional y contextualizado a las realidades territoriales.

El siguiente flujograma sintetiza el proceso metodológico para la elaboración de la estructura sistémica propuesta.

Figura 22. Flujograma metodológico para elaboración de la estructura sistémica



Elaboración propia (2025)

8.2. RESULTADOS Y DISCUSIONES

La elaboración de la estructura sistémica se fundamentó en un proceso de priorización basado en los criterios de relevancia, dependencia e integralidad, llevado a cabo mediante la consulta a doce expertos con conocimiento especializado en amenaza, vulnerabilidad y riesgo socioambiental asociados a la contaminación por metales pesados. Estos expertos, además, poseen familiaridad con el contexto territorial de la cuenca del río Quito, ya sea por experiencia directa o mediante revisión bibliográfica.

A partir del ejercicio de validación individual que plantea la metodología 3S se realizó una revisión de los aspectos priorizados con el fin de ajustar la redacción de algunos incluidos en el listado presentado en la Tabla 18. A continuación, se detallan los cambios aplicados (ver tabla 30). En primer lugar, la modificación del aspecto “afectación a la fauna y flora aledaña” por “afectación a la fauna y flora autóctona o locales” implica una diferencia importante frente al valor ecológico de aspecto al centrarse en las especies propias del territorio, especialmente en regiones que hacen parte del Chocó Biogeográfico. En segundo lugar, sustituir “afectación de la seguridad del ecosistema” por “afectación a la integridad del ecosistema” que es un término más propio de la ecología y esta alineado con la funcionalidad, estructura y resiliencia del ecosistema. También, el cambio de “contaminación de residuos sólidos peligrosos y/o tóxicos” a “contaminación causada por residuos sólidos peligrosos y/o tóxicos” el cual clarifica la relación causal del fenómeno, evitando ambigüedades y mejorando la coherencia del lenguaje técnico. Por último, se agregó la palabra contaminado en el aspecto “ausencia de políticas públicas y directrices para el consumo de pescado contaminado” para mejor claridad. La Tabla 30 presenta estos cambios aceptados.

Tabla 30. Cambios aplicados al listado de aspectos socioambientales

Número del aspecto	Aspecto original	Aspecto modificado
3	Afectación a la fauna y flora aledaña	Afectación a la fauna y flora autóctona o locales
8	Afectación de la seguridad del ecosistema	Afectación a la integridad del ecosistema
20	Contaminación de residuos sólidos peligrosos y/o tóxicos	Contaminación causada por residuos sólidos peligrosos y/o tóxicos
13	Ausencia de políticas públicas y directrices para el consumo de pescado	Ausencia de políticas públicas y directrices para el consumo de pescado contaminado

Elaboración propia (2025)

8.2.1. Priorización de los aspectos socioambientales de acuerdo con los criterios definidos

Los doce expertos consultados realizaron la evaluación de los 58 aspectos a partir de los criterios definidos en la metodología, a estos resultados se les aplicó el método de Borda para definir el ranking de prioridad (Radulescu; Radulescu; Boncea, 2022). Para el criterio de relevancia del impacto, que indicó la importancia y pertinencia con relación a la problemática específica de la contaminación por metales pesados, se presentan los resultados de la Tabla 31. Los expertos consideraron 26 aspectos muy relevantes y 6 poco relevantes.

Tabla 31. Resultados para el criterio de relevancia del aspecto

Aspectos más relevantes	Aspectos poco relevantes
Afectación a la biodiversidad acuática por contaminación	Alteración geomorfológica del cauce
Afectación a la calidad de vida	Compactación del suelo
Afectación a la fauna y flora autóctona o locales	Limitación en el uso recreativo del río
Afectación a la salud del ecosistema	Limitaciones en la navegabilidad del río
Afectación a la salud humana	Presencia de actividades turísticas (Uso y ocupación del suelo)
Afectación a la seguridad hídrica	Salinización del agua y suelo
Alteración del equilibrio ecológico	
Ausencia de políticas públicas y directrices para el consumo de pescado contaminado	
Bioacumulación y biomagnificación de metales pesados en la cadena trófica acuática y terrestre	
Biodisponibilidad de metales pesados	
Calidad del agua inadecuada	
Contaminación causada por residuos sólidos peligrosos y/o tóxicos	
Contaminación del agua por metales pesados	
Contaminación del suelo y sedimentos por metales pesados	
Degradación Ambiental de Ecosistemas y Hábitats Acuáticos	
Descarga de aguas industriales, mineras, agrícolas y domésticas	
Existencia de fuente de contaminación difusa	
Exposición humana a metales pesados por ingesta de alimentos o agua	
Localización cercana a fuentes hídricas contaminadas	
Movilización de metales pesados por acidez en suelos y aguas	
Movilización de metales pesados por escorrentía	
Movilización de metales pesados por inundación	

Aspectos más relevantes	Aspectos poco relevantes
Persistencia de metales pesados en el ambiente	
Presencia de pasivos ambientales mineros	
Re-movilización de contaminantes en los sistemas acuáticos	
Vulnerabilidad social y a la salud	

Fuente: Elaboración propia (2025)

La selección de los aspectos considerados más relevantes responde a su vínculo estrecho con los procesos determinantes de la contaminación por metales pesados y su capacidad para incidir directamente en la configuración de la amenaza y la vulnerabilidad socioambiental en la cuenca del río Quito. Elementos como la afectación a la salud humana, la biodiversidad acuática, la seguridad hídrica y la bioacumulación de metales en la cadena trófica fueron priorizados por los expertos debido a que representan efectos críticos tanto en los ecosistemas como en las comunidades expuestas (Córdoba-Tovar et al., 2023a; Salazar-Camacho et al., 2020b, 2021a). Estos aspectos permiten comprender el riesgo desde una perspectiva sistémica, que promueva estrategias de monitoreo, intervención y formulación de políticas públicas para la gestión del riesgo ambiental en cuencas afectadas por minería.

Por su parte, los aspectos clasificados como de baja relevancia presentan una incidencia secundaria frente a la problemática central de la contaminación por metales pesados. Variables como la compactación del suelo, las restricciones recreativas o la presencia de actividades turísticas, si bien reflejan ciertas transformaciones del entorno, no guardan una relación directa con los mecanismos de generación, movilización o exposición a dichos contaminantes. No obstante, dada la conexidad de la alteración geomorfológica del cauce con procesos como la sedimentación, la erosión, la pérdida de navegabilidad, la disminución del caudal y el aumento de la turbidez del agua (todos ellos aspectos clave para evaluar la vulnerabilidad de la cuenca del río Quito), el autor de esta tesis doctoral consideró que el aspecto “alteración geomorfológica del cauce” debe ser incluido en etapas posteriores del análisis. Por ello, se incorporará en el desarrollo de la matriz de impactos cruzados a través del software MICMAC.

Para el criterio de dependencia, que evalúa el grado en que cada aspecto socioambiental está condicionado por factores externos o interactúa con otras variables del sistema socio-ecológico, se presentan los resultados en la Tabla 32. Los expertos consideraron 28 aspectos con mayor dependencia y 30 con menor dependencia. Es fundamental indicar que la puntuación más alta fue 4 y la más baja fue 3, por tanto no se habla de baja dependencia, sino de una menor dependencia referente a los aspectos con mayor puntuación.

Tabla 32. Resultados para el criterio de dependencia del aspecto

Aspectos con mayor dependencia	Aspectos con menor dependencia
Afectación a la biodiversidad acuática por contaminación	Afectación a la seguridad hídrica
Afectación a la calidad de vida	Contaminación causada por residuos sólidos peligrosos y/o tóxicos
Afectación a la fauna y flora autóctona o locales	Movilización de metales pesados por escorrentía
Afectación a la salud del ecosistema	Afectación de dimensiones socioculturales
Afectación a la salud humana	Alteración de las condiciones geológicas, topográficas y geomorfológicas
Alteración del equilibrio ecológico	Alteración de las condiciones hidrogeológicas
Ausencia de políticas públicas y directrices para el consumo de pescado contaminado	Cambio en los procesos geoquímicos
Bioacumulación y biomagnificación de metales pesados en la cadena trófica acuática y terrestre	Débil fiscalización de normas y políticas ambientales
Biodisponibilidad de metales pesados	Deposición atmosférica de metales pesados
Calidad del agua inadecuada	Disminución de la capacidad de resiliencia de los ríos
Contaminación del agua por metales pesados	Emisiones de contaminantes atmosféricos
Contaminación del suelo y sedimentos por metales pesados	Erosión
Degradación Ambiental de Ecosistemas y Hábitats Acuáticos	Inclusión del comportamiento climático de la región
Descarga de aguas industriales, mineras, agrícolas y domésticas	Ocupación irregular del entorno de las áreas preservadas
Existencia de fuente de contaminación difusa	Pérdida de cosechas por metales pesados
Exposición humana a metales pesados por ingesta de alimentos o agua	Prácticas agrícolas insostenibles
Localización cercana a fuentes hídricas contaminadas	Presencia de actividades del sector agropecuario (Uso y ocupación del suelo)
Movilización de metales pesados por acidez en suelos y aguas	Presencia de actividades industriales y mineras (Uso y ocupación del suelo)
Movilización de metales pesados por inundación	Presencia de áreas ambientales protegidas
Persistencia de metales pesados en el ambiente	Presión antrópica por crecimiento poblacional y migración
Presencia de pasivos ambientales mineros	Proliferación de cianobacterias
Re-movilización de contaminantes en los sistemas acuáticos	Saneamiento ambiental inadecuado
Vulnerabilidad social y a la salud	Uso inadecuado de los recursos hídricos
Afectación a la integridad del ecosistema	Vulnerabilidad por condiciones socioeconómicas y de acceso
Cambio en el uso del suelo	Alteración geomorfológica del cauce
Deforestación	Compactación del suelo
Degradación Ambiental de Ecosistemas y Hábitats terrestres	Limitación en el uso recreativo del río
Presencia de rellenos sanitarios o sitios de disposición final de residuos sólidos	Limitaciones en la navegabilidad del río
	Presencia de actividades turísticas (Uso y ocupación del suelo)
	Salinización del agua y suelo

Fuente: Elaboración propia (2025)

Los resultados anteriores indican que, si bien existe variabilidad en la interacción de los aspectos dentro del sistema, todos ellos presentan cierto grado de sensibilidad frente a los procesos que configuran la amenaza y la vulnerabilidad por contaminación con metales pesados en la cuenca del río Quito.

Los aspectos clasificados con mayor dependencia, tales como la afectación a la biodiversidad acuática, la calidad de vida, la salud humana, la persistencia de metales pesados, la degradación de ecosistemas y la bioacumulación en la cadena trófica, fueron considerados por los expertos como prioritarios para su inclusión en la estructura sistémica, catalogándolos como potenciales variables de resultado. Esta priorización se sustenta en su elevada sensibilidad frente a transformaciones en las dinámicas ambientales, sociales, económicas e institucionales, lo que implica que su comportamiento puede variar significativamente ante cambios en otras variables del sistema. Estos aspectos presentan un comportamiento altamente variable y reactivo frente a otras variables del sistema, lo que los convierte en elementos estratégicos para comprender cómo se configura y propaga el riesgo en el territorio. Su incorporación en la estructura sistémica permitirá representar mejor las interacciones y retroalimentaciones que caracterizan al riesgo socioambiental, lo cual resulta fundamental para diseñar estrategias de gestión más eficaces, adaptativas y basadas en una comprensión integral del sistema (Briffa; Sinagra; Blundell, 2020; Guerrero et al., 2020).

En relación con los aspectos valorados con menor dependencia relativa, se observa que tienden a mantener un comportamiento más estable o autónomo dentro del sistema. Variables como la erosión, las emisiones atmosféricas, el cambio climático regional o la presión antrópica por crecimiento poblacional presentan una dinámica más estructural, actuando como condicionantes del riesgo en lugar de ser directamente afectados por él, además se evidencia mayor asociación con la vulnerabilidad (Sharafi; Salehi, 2025). Así, a pesar de que su dependencia los posiciona en un plano menos reactivo frente a las fluctuaciones del sistema, continúan siendo fundamentales para la comprensión del contexto territorial.

Para el criterio de integralidad, que evalúa la capacidad de un aspecto para reflejar de manera holística las interrelaciones entre los componentes sociales, ambientales y económicos del territorio, se presentan los resultados en la Tabla 33. Los expertos identificaron 15 aspectos con un alto nivel de integralidad y 6 con un nivel bajo. Esta valoración permite reconocer aquellos elementos que contribuyen a una visión sistémica del riesgo, facilitando una

representación más completa y coherente de la complejidad territorial asociada a la contaminación por metales pesados.

Tabla 33. Resultados para el criterio de dependencia del aspecto

Aspectos más integrales	Aspectos menos integrales
Afectación a la biodiversidad acuática por contaminación	Proliferación de cianobacterias
Afectación a la calidad de vida	Compactación del suelo
Afectación a la salud del ecosistema	Limitación en el uso recreativo del río
Afectación a la salud humana	Limitaciones en la navegabilidad del río
Afectación a la seguridad hídrica	Presencia de actividades turísticas (Uso y ocupación del suelo)
Alteración del equilibrio ecológico	Salinización del agua y suelo
Ausencia de políticas públicas y directrices para el consumo de pescado contaminado	
Bioacumulación y biomagnificación de metales pesados en la cadena trófica acuática y terrestre	
Calidad del agua inadecuada	
Contaminación del agua por metales pesados	
Degradación Ambiental de Ecosistemas y Hábitats Acuáticos	
Exposición humana a metales pesados por ingesta de alimentos o agua	
Vulnerabilidad social y a la salud	
Degradación Ambiental de Ecosistemas y Hábitats terrestres	
Vulnerabilidad por condiciones socioeconómicas y de acceso	

Fuente: Elaboración propia (2025)

Los aspectos considerados más integrales, como la afectación a la salud humana, la calidad de vida, la degradación de ecosistemas, la seguridad hídrica, la exposición humana a metales y la ausencia de políticas públicas y directrices para el consumo de pescado contaminado, permiten vincular de forma simultánea procesos ecológicos, condiciones sociales y capacidad de respuesta institucional. Su incorporación en el modelo fortalece la capacidad para representar relaciones clave del sistema, lo que es esencial para orientar acciones de gestión con enfoque intersectorial y territorialmente pertinente.

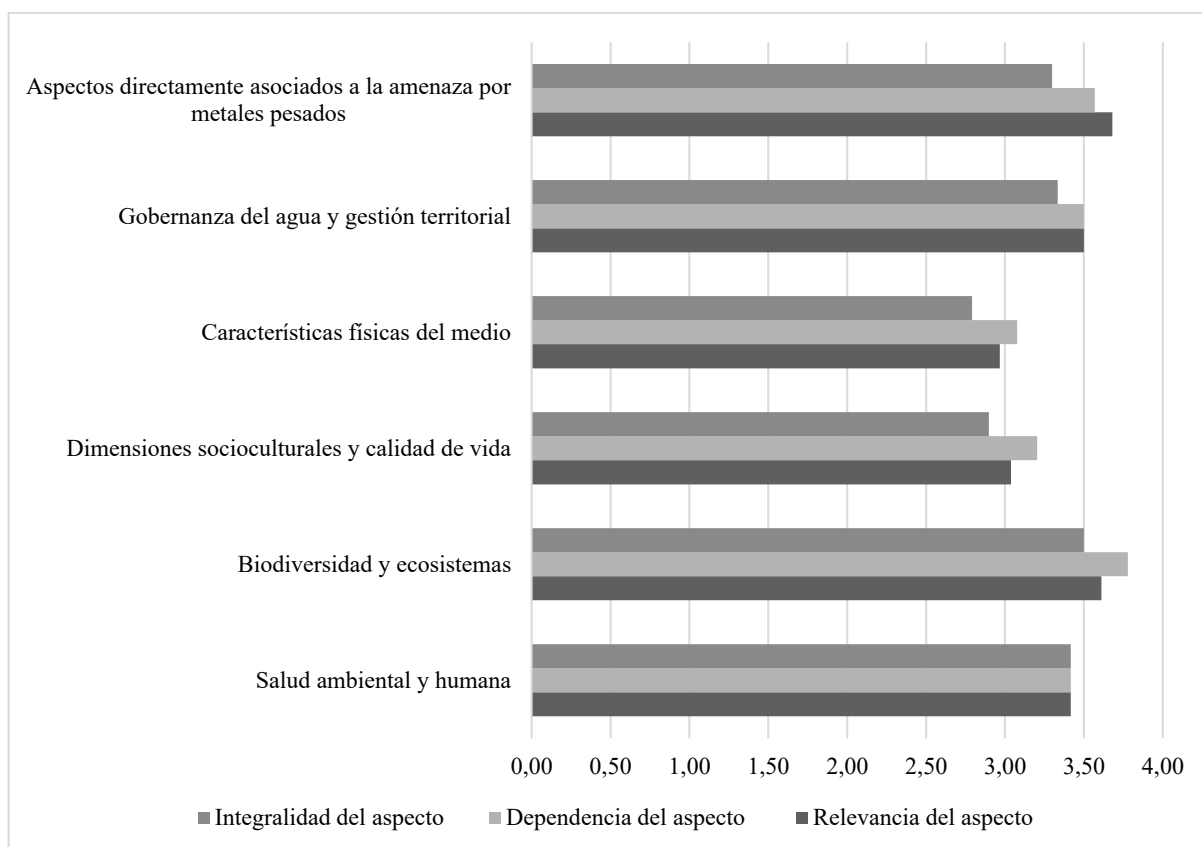
Por su parte, los aspectos con menor integralidad, como la compactación del suelo, la salinización del agua o la proliferación de cianobacterias, se asocian principalmente a efectos ambientales específicos y no abarcan en su formulación conexiones sustantivas con dimensiones sociales o económicas del territorio. Si bien son relevantes en términos técnicos,

su aporte a la comprensión integrada del riesgo es más limitado. Adicionalmente al comparar los criterios menos relevantes e integrales, se evidencia una coincidencia significativa en la evaluación de expertos.

8.2.2. Priorización de las categorías asociadas a los aspectos socioambientales

A partir de la Tabla 18, se construyó la priorización por categorías con base en las puntuaciones otorgadas por los expertos durante la consulta. Para asignar una puntuación a cada categoría, se calculó el promedio de los aspectos asociados, considerando un peso igual para cada uno. El resultado de este ejercicio se presenta en la Figura 23, donde se refleja el nivel de importancia relativa de cada categoría dentro del análisis del riesgo socioambiental asociado a la contaminación por metales pesados.

Figura 23. Priorización por categoría de los aspectos socioambientales



Fuente: Elaboración propia (2025)

Los resultados obtenidos a partir de la priorización por categorías, con base en los tres criterios definidos (relevancia, dependencia e integralidad), muestran un comportamiento general relativamente homogéneo, con valores promedio que oscilan entre 2,79 y 3,78 en una

escala de 1 a 4. Esta distribución indica un alto nivel de consenso entre los expertos respecto a la importancia transversal de las distintas categorías analizadas para la construcción de la estructura sistémica. No obstante, es posible identificar diferencias que permiten jerarquizar categorías dentro del análisis del riesgo socioambiental asociado a la contaminación por metales pesados.

La categoría “aspectos directamente asociados a la amenaza por metales pesados” obtuvo las puntuaciones más altas en relevancia (3,68) y se ubicó también entre las más destacadas en dependencia (3,57), lo cual evidencia su importancia estratégica al representar explícitamente el factor de amenaza. “Biodiversidad y ecosistemas” presentó el mayor valor en el criterio de dependencia (3,78) y una alta integralidad (3,50), lo que refleja su sensibilidad frente a los cambios en el sistema socio-ecológico. “Gobernanza del agua y gestión territorial” también se posicionó favorablemente, con valores equilibrados en los tres criterios, especialmente en dependencia e integralidad (ambos $\geq 3,33$), a pesar de tener pocos aspectos relacionados, los presentes se consideraron necesarios en la estructura sistémica. Por otro lado, las categorías “Dimensiones socioculturales y calidad de vida” y “Características físicas del medio” mostraron las puntuaciones más bajas, particularmente en el criterio de integralidad (2,90 y 2,79, respectivamente), lo que sugiere una menor capacidad para reflejar la interacción sistémica del riesgo, al estar centradas en aspectos socioambientales más específicos del contexto.

8.2.3. Elaboración de la matriz de impactos cruzados

A partir de la evaluación realizada por los expertos y de una nueva revisión individual y del equipo de investigación de esta tesis doctoral (director, codirector y doctorando) basada en la metodología de validación 3S (Cloquell-Ballester et al., 2006), se realizó un filtro sobre el listado de 58 aspectos socioambientales, excluyendo algunos con menor puntuación en cuanto a los criterios de relevancia, dependencia e integralidad y eliminando redundancias detectadas en la revisión. Se presenta a continuación el listado definitivo de 45 aspectos socioambientales que será procesado en el software, la abreviatura definida y la categoría a la cual se encuentra asociado el aspecto, esta abreviatura es requerida por MICMAC para la elaboración de las salidas gráficas del mapa de influencia y dependencia.

Tabla 34. Listado definitivo de aspectos socioambientales

Nº	Aspecto socioambiental	Categoría	Abreviatura
1	Afectación a la biodiversidad acuática y terrestre local	Biodiversidad y ecosistemas	Afbioacute
2	Afectación a la calidad de vida	Salud ambiental y humana	Afcvida
3	Afectación a la salud del ecosistema	Salud ambiental y humana	Afsalueco
4	Afectación a la salud humana	Salud ambiental y humana	Afsaluhum
5	Afectación a la seguridad hídrica	Salud ambiental y humana	Afseguhid
6	Afectación de dimensiones socioculturales	Dimensiones socioculturales y calidad de vida	Afsociocul
7	Afectación a la integridad y equilibrio del ecosistema	Biodiversidad y ecosistemas	Afinteco
8	Alteración de las condiciones geológicas, topográficas y geomorfológicas	Características físicas del medio	Afgeotopmo
9	Alteración de las condiciones hidrogeológicas	Características físicas del medio	Alconhidro
10	Alteración geomorfológica del cauce	Características físicas del medio	Algeocauce
11	Ausencia de políticas públicas y directrices para el consumo de pescado contaminado	Gobernanza del agua y gestión territorial	Ausenpolit
12	Bioacumulación y biomagnificación de metales pesados	Aspectos directamente asociados a la amenaza por metales pesados	Bioacubiom
13	Biodisponibilidad de metales pesados	Aspectos directamente asociados a la amenaza por metales pesados	Biodispmet
14	Cambio en el uso del suelo	Dimensiones socioculturales y calidad de vida	Camusosuel
15	Contaminación causada por residuos sólidos peligrosos y/o tóxicos	Aspectos directamente asociados a la amenaza por metales pesados	Conrestox
16	Contaminación del agua por metales pesados	Aspectos directamente asociados a la amenaza por metales pesados	Conmetales
17	Contaminación del suelo y sedimentos por metales pesados	Aspectos directamente asociados a la amenaza por metales pesados	Consuesdm
18	Débil fiscalización de normas y políticas ambientales	Gobernanza del agua y gestión territorial	Debfiscapo
19	Deforestación	Dimensiones socioculturales y calidad de vida	Defores
20	Deposición atmosférica de metales pesados	Aspectos directamente asociados a la amenaza por metales pesados	Depoatmmet
21	Disminución de la capacidad de resiliencia de los ríos	Dimensiones socioculturales y calidad de vida	Disresilri
22	Emisiones de contaminantes atmosféricos	Dimensiones socioculturales y calidad de vida	Emicontatm
23	Erosión	Características físicas del medio	Erosion
24	Existencia de fuente de contaminación difusa	Aspectos directamente asociados a la amenaza por metales pesados	Exiscondif

Nº	Aspecto socioambiental	Categoría	Abreviatura
25	Exposición humana a metales pesados por ingesta de alimentos o agua	Aspectos directamente asociados a la amenaza por metales pesados	Expohummet
26	Inclusión del comportamiento climático de la región	Dimensiones socioculturales y calidad de vida	Inclimatic
27	Limitación en el uso recreativo del río	Dimensiones socioculturales y calidad de vida	Limrecri
28	Limitaciones en la navegabilidad del río	Dimensiones socioculturales y calidad de vida	Limnavegar
29	Localización cercana a fuentes hídricas contaminadas	Dimensiones socioculturales y calidad de vida	Cercafhcon
30	Mobilización de metales pesados por acidez en suelos y aguas	Aspectos directamente asociados a la amenaza por metales pesados	Movmetaagu
31	Mobilización de metales pesados por escorrentía	Aspectos directamente asociados a la amenaza por metales pesados	Movmetaesc
32	Mobilización de metales pesados por inundación	Características físicas del medio	Movmetainu
33	Ocupación irregular del entorno de las áreas preservadas	Dimensiones socioculturales y calidad de vida	Ocuareaspr
34	Pérdida de cosechas por metales pesados	Aspectos directamente asociados a la amenaza por metales pesados	Perdidacos
35	Persistencia de metales pesados en el ambiente	Aspectos directamente asociados a la amenaza por metales pesados	Persistenm
36	Evidencia de prácticas agrícolas insostenibles	Dimensiones socioculturales y calidad de vida	Pracagroin
37	Presencia de actividades del sector agropecuario	Salud ambiental y humana	Presenagro
38	Presencia de actividades industriales y mineras	Salud ambiental y humana	Presenmine
39	Presencia de áreas ambientales protegidas	Dimensiones socioculturales y calidad de vida	Presenarea
40	Presencia de pasivos ambientales mineros	Dimensiones socioculturales y calidad de vida	Presenpasi
41	Presencia de rellenos sanitarios o sitios de disposición final de residuos sólidos	Dimensiones socioculturales y calidad de vida	Presenrell
42	Presión antrópica por crecimiento poblacional y migración	Dimensiones socioculturales y calidad de vida	Crecipobla
43	Re-mobilización de contaminantes en los sistemas acuáticos	Dimensiones socioculturales y calidad de vida	Removconag
44	Saneamiento ambiental inadecuado	Dimensiones socioculturales y calidad de vida	Saneabient
45	Uso inadecuado de los recursos hídricos	Dimensiones socioculturales y calidad de vida	Usoinarech

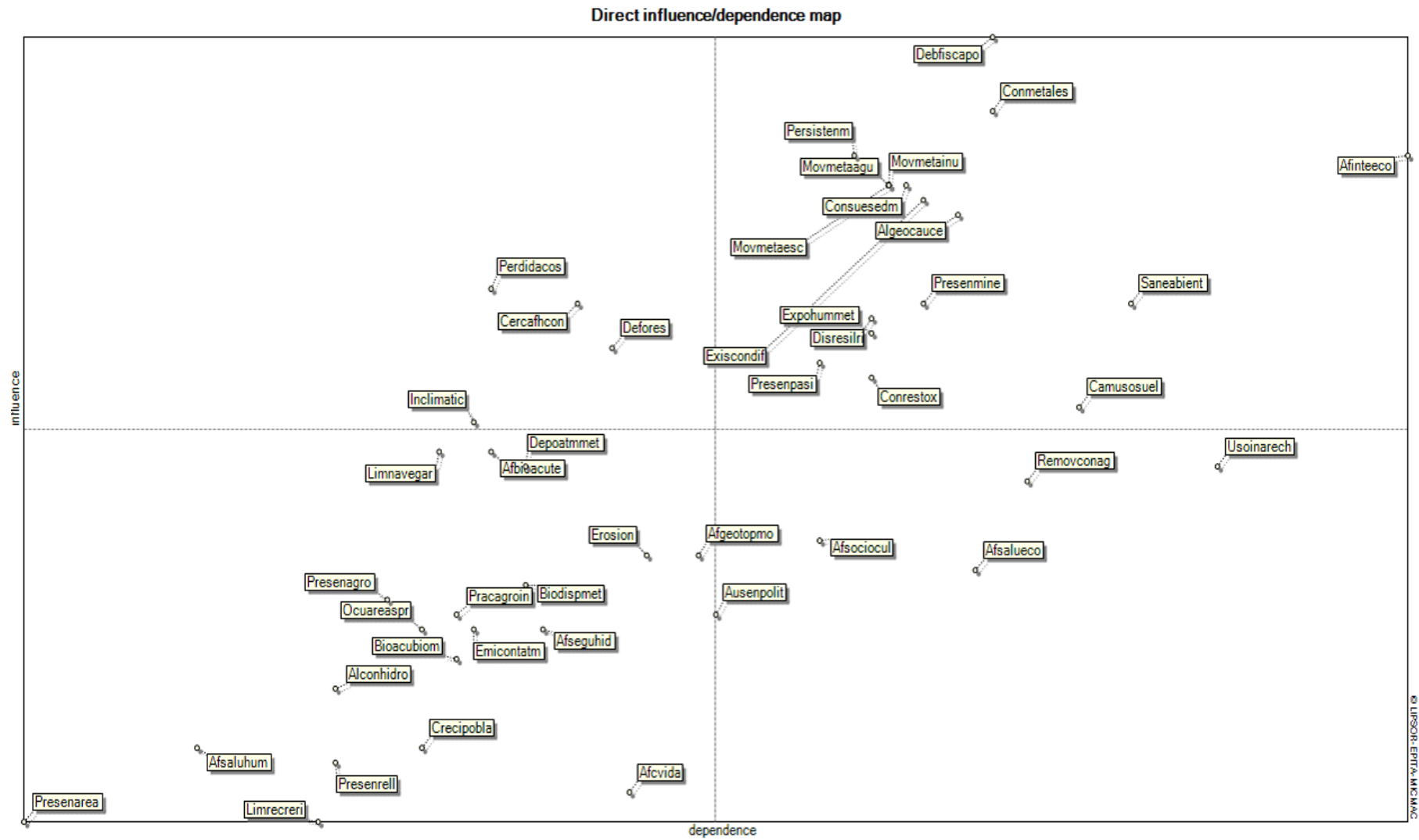
Fuente: Elaboración propia (2025)

Los aspectos socioambientales identificados fueron organizados en una matriz de impactos cruzados con el propósito de analizar sus relaciones de influencia y dependencia como etapa previa al procesamiento mediante el software MICMAC. Esta matriz se construyó a partir de comparaciones par a par entre los 45 aspectos seleccionados, asignando valoraciones que reflejan el grado de influencia de un aspecto sobre los demás, así como su nivel de dependencia.

El análisis arrojó una influencia total de 1184 y una dependencia total de 1123, calculadas a partir de la sumatoria de las valoraciones obtenidas en todas las interacciones posibles. Dado que el número máximo de puntuación alcanzable para una matriz de 45 x 45 es de 6075, se indica una adecuada diferenciación y depuración de los aspectos, permitiendo identificar aquellos con mayor peso en términos de su influencia y dependencia.

Los datos obtenidos fueron incorporados al software MICMAC para la elaboración del mapa de influencia-dependencia, herramienta clave para la priorización de los aspectos más relevantes en la construcción de una estructura sistémica para la gestión del riesgo socioambiental derivado de la contaminación por metales pesados en río Quito. La matriz de impactos cruzados se encuentra disponible en el Anexo 3. El mapa de influencia y dependencia generado a partir de MICMAC se presenta en la siguiente figura 24.

Figura 24. Mapa de influencia y dependencia



Fuente: Elaboración propia (2025)

A partir de esta figura se pudo inferir que los aspectos con alta dependencia y relevancia, ubicadas en el cuadrante superior derecho serán las variables finales consideradas en la estructura sistémica que se propone como producto de esta investigación, dado que son los aspectos más relevantes, integrales y sensibles en la evaluación del riesgo socioambiental derivado de la contaminación por metales pesados. Por su parte, los aspectos del cuadrante inferior izquierdo fueron descartados por considerarse de baja influencia y dependencia, con alta probabilidad de que la información aportada por este grupo de variables también este siendo aportada por variables del cuadrante superior derecho (Rosenfeld et al., 2022), es decir, mediante este análisis se evita la duplicidad en la información que puede llevar a conclusiones inadecuadas al operar el modelo. Dos variables ubicadas muy cerca del eje X, que fueron la deposición atmosférica y la re-movilización de metales pesados, se incluyeron dentro del modelo conceptual planteado, debido a que el análisis estadístico mostró equilibrio en cuanto a su dependencia e influencia en el grupo de variables evaluadas, no obstante, no existe otra variable dentro del grupo del cuadrante superior derecho que pueda aportar información al modelo asociada con estos dos aspectos, en este sentido, se consideró pertinente su inclusión.

Por su parte, los aspectos ubicados en el cuadrante inferior derecho, de acuerdo con lo planteado por MICMAC (Benjumea-Arias; Castañeda; Valencia-Arias, 2016), corresponden a variables de resultado y su función no es aportar información a la estructura sistémica sino actuar como respuesta ante los insumos y procesamientos, cuantificando o traduciendo a números, la amenaza, la vulnerabilidad y/o el riesgo que se busca evaluar, por tal motivo fueron excluidas del modelo conceptual, toda vez que su evaluación de forma independiente ya indica la existencia de un riesgo de forma directa. La Tabla 35 muestra los resultados de los tipos de variables generados por el mapa de influencia y dependencia de acuerdo con el cuadrante, que fueron el insumo para establecer la estructura sistémica.

Tabla 35. Tipos de variables generados por el mapa de influencia y dependencia

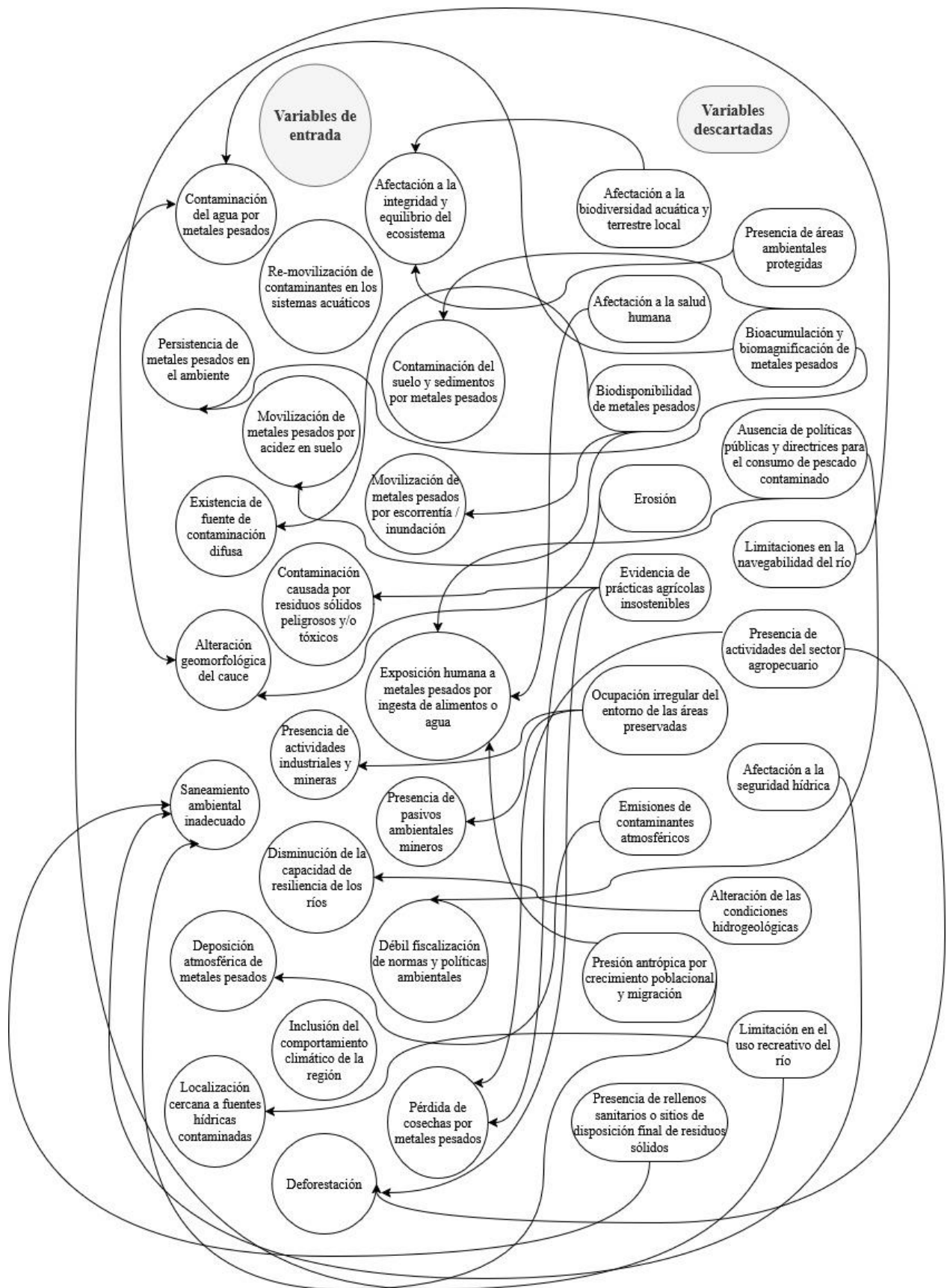
Nº	Variables de entrada	Variables descartadas	Variables de resultado
1	Afectación a la integridad y equilibrio del ecosistema	Afectación a la biodiversidad acuática y terrestre local	Afectación a la salud del ecosistema
2	Contaminación del agua por metales pesados	Presencia de áreas ambientales protegidas	Afectación a la calidad de vida
3	Re-movilización de contaminantes en los sistemas acuáticos	Afectación a la salud humana	Afectación de dimensiones socioculturales

Nº	Variables de entrada	Variables descartadas	Variables de resultado
4	Contaminación del suelo y sedimentos por metales pesados	Bioacumulación y biomagnificación de metales pesados	Cambio en el uso del suelo
5	Persistencia de metales pesados en el ambiente	Biodisponibilidad de metales pesados	Uso inadecuado de los recursos hídricos
6	Movilización de metales pesados por acidez en suelo	Ausencia de políticas públicas y directrices para el consumo de pescado contaminado	Alteración de las condiciones geológicas, topográficas y geomorfológicas
7	Movilización de metales pesados por escorrentía o inundación	Erosión	
8	Existencia de fuente de contaminación difusa	Limitaciones en la navegabilidad del río	
9	Contaminación causada por residuos sólidos peligrosos y/o tóxicos	Evidencia de prácticas agrícolas insostenibles	
10	Exposición humana a metales pesados por ingesta de alimentos o agua	Presencia de actividades del sector agropecuario	
11	Alteración geomorfológica del cauce	Ocupación irregular del entorno de las áreas preservadas	
12	Presencia de actividades industriales y mineras	Afectación a la seguridad hídrica	
13	Presencia de pasivos ambientales mineros	Emisiones de contaminantes atmosféricos	
14	Saneamiento ambiental inadecuado	Alteración de las condiciones hidrogeológicas	
15	Disminución de la capacidad de resiliencia de los ríos	Presión antrópica por crecimiento poblacional y migración	
16	Débil fiscalización de normas y políticas ambientales	Limitación en el uso recreativo del río	
17	Deposición atmosférica de metales pesados	Presencia de rellenos sanitarios o sitios de disposición final de residuos sólidos	
18	Inclusión del comportamiento climático de la región		
19	Pérdida de cosechas por metales pesados		
20	Localización cercana a fuentes hídricas contaminadas		
21	Deforestación		

Fuente: Elaboración propia (2025)

El análisis realizado con MICMAC permitió complementar la etapa de validación científica mediante una evaluación sistémica de las relaciones entre los aspectos socioambientales definidos. Mientras que en la consulta cada aspecto fue valorado de forma individual, el análisis con MICMAC se centró en comparar las variables entre sí, identificando patrones de influencia y dependencia. Esto permitió evidenciar cuáles variables tienen mayor relevancia en la dinámica del sistema y cuáles dependen en mayor medida de otras. A partir de este cruce de relaciones, fue posible filtrar el conjunto inicial de aspectos socioambientales, eliminando aquellos con bajo nivel de incidencia o que estaban contenidos en otros. Como resultado se obtuvo una selección más precisa de aspectos, los cuales fueron usados como insumo para el desarrollo de la estructura sistémica para la gestión del riesgo socioambiental asociado a la contaminación por metales pesados, la siguiente figura ilustra las relaciones de dependencia entre las variables descartadas y las variables de entrada finalmente seleccionadas para el modelo conceptual.

Figura 25. Relaciones de dependencia entre variables de entrada y variables descartadas



Fuente: Elaboración propia (2025)

El análisis de relaciones entre variables, presentado en la figura 25, identificó redundancias entre distintos aspectos socioambientales. En particular, se observó que variables como la *afectación a la biodiversidad acuática y terrestre local* y la *presencia de áreas ambientales protegidas* fueron descartadas debido a su incorporación implícita dentro de la variable *afectación a la integridad y equilibrio del ecosistema*, la cual representa una dimensión más amplia del impacto ecológico (Córdoba-Tovar et al., 2023a). Esta última variable refleja de manera más completa los efectos acumulativos y sinérgicos sobre los ecosistemas afectados por la contaminación en la cuenca del río Quito.

De manera similar, los aspectos *erosión y limitaciones en la navegabilidad del río* fueron incorporados dentro de la variable *alteración geomorfológica del cauce*, la cual, en el caso específico de la cuenca del río Quito, responde principalmente a las transformaciones físicas provocadas por la minería ilegal de oro. Esta actividad, caracterizada por el uso de maquinaria pesada y la remoción intensiva de material, ha generado una modificación severa del lecho y las márgenes del río, dando lugar a procesos de sedimentación excesiva, agradación del cauce, pérdida de conectividad hidrológica y alteraciones en la morfología fluvial (Asprilla Mosquera, 2019; Mount, 2020). Estos impactos comprometen la estabilidad ecológica del sistema y afectan las comunidades ribereñas, especialmente en términos de navegabilidad y acceso a medios de transporte fluvial.

En cuanto a los aspectos vinculados con la salud humana y la gobernanza, se identificó que la *afectación a la salud humana* y la *ausencia de políticas públicas y directrices para el consumo de pescado* contaminado están reflejadas de forma más precisa y operativa en aspectos como *exposición humana a metales pesados por ingesta de alimentos o agua* y *débil fiscalización de normas y políticas ambientales*. Estas últimas también resultan más prácticas y fáciles de determinar de forma directa, permitiendo establecer vínculos causales y rutas de exposición claras (Schäfer et al., 2015). Por su parte, la variable *bioacumulación y biomagnificación de metales pesados*, a pesar de ser fundamental al evaluar la magnitud de la amenaza, se excluyó del listado, debido a que no es posible su medición directa en campo. En cambio, se priorizaron variables como *contaminación del agua por metales pesados* y *contaminación del suelo y sedimentos por metales pesados*, así como aquellas que describen la *movilización* de estos elementos en distintas matrices ambientales, cuya medición es viable y verificable.

8.2.4. Estructura sistémica para la gestión de riesgos socioambientales en la cuenca del río Quito

La estructura sistémica tomó como base la figura 5 que sintetiza el planteamiento conceptual desarrollado en el Capítulo 1 a partir del análisis etimológico de los términos amenaza, vulnerabilidad y riesgo. En este esquema conceptual se representó la relación de convolución entre la amenaza y la vulnerabilidad como fundamento para la generación del riesgo, destacando que esta no es una relación lineal ni aditiva, sino una interacción funcional entre factores externos e internos del sistema. La amenaza se asocia a las variables que actúan como un factor externo caracterizadas por su magnitud, duración y extensión espacial, mientras que la vulnerabilidad es representada por las características propias de la cuenca del río Quito que la hacen vulnerable ante la contaminación por metales pesados y está asociada a la exposición, sensibilidad y capacidad de adaptación del sistema socioambiental. La interacción entre ambos determina el riesgo, entendido como una condición dinámica que varía en el tiempo y cambia de acuerdo a las condiciones y al estado de afectación socioambiental de la cuenca del río Quito, lo que permite su reducción, mitigación o control a partir de instrumentos de gestión (Cardona, 2001; Cutter, 1996b; Ellison, 2015; Turner et al., 2003).

En este sentido, los 21 aspectos socioambientales fueron analizados a partir de los conceptos adoptados en esta investigación, generándose los grupos de variables para la determinación de la amenaza y vulnerabilidad en la cuenca del río Quito. La Tabla 36 muestra las variables finales que integraran la estructura sistémica.

Tabla 36. Variables relacionadas con la amenaza y vulnerabilidad

Variables relacionadas con la amenaza	Elementos de la amenaza			Variables relacionadas con la vulnerabilidad	Elementos de la vulnerabilidad		
	M	T	E		Ex	S	CA
Nivel de contaminación del agua, suelos y sedimentos por metales pesados	X			Extensión de la cobertura vegetal		X	X
Dispersión y deposición atmosférica de metales pesados	X		X	Saneamiento ambiental y acceso a servicios de salud y agua potable	X	X	X
Re-movilización de metales pesados	X			Biodiversidad y servicios ecosistémicos		X	X
Persistencia de metales pesados		X		Ingesta de agua o alimentos contaminados con metales pesados	X		
Movilidad de metales pesados			X	Resiliencia del sistema hídrico			X

Variables relacionadas con la amenaza	Elementos de la amenaza			Variables relacionadas con la vulnerabilidad	Elementos de la vulnerabilidad		
	M	T	E		Ex	S	CA
Vertimiento de residuos líquidos peligrosos	X			Conservación de medios de vida tradicionales y sostenibles		X	X
Expansión de la minería ilegal			X	Suficiencia de la fiscalización y control ambiental			X
Pasivos ambientales mineros	X			Consolidación de la gobernanza en torno al agua			X
Degradación geomorfológica del cauce	X			Niveles de pobreza y educación	X	X	X
Altos niveles de pluviosidad	X						
Aumento de temperatura y otras alteraciones climáticas	X						

Donde M: magnitud; T: tiempo; E: extensión; Ex: exposición; S: sensibilidad y CA: capacidad de adaptación.

Fuente: Elaboración propia (2025)

La asociación de las variables con los elementos de la amenaza presentada en la tabla 36, responde al tipo de impacto que generan en términos de intensidad, duración y escala espacial. Por ejemplo, el *nivel de contaminación del agua, suelos y sedimentos por metales pesados* se relaciona exclusivamente con la magnitud, dado que su principal aporte al riesgo está en la concentración de contaminantes que puede alcanzar niveles por encima de los límites o valores de referencia (Palacios-Torres; De La Rosa; Olivero-Verbel, 2020). La *dispersión y deposición atmosférica* se vincula tanto a la magnitud, como a la extensión, pues involucra una carga contaminante con capacidad de expandirse más allá de los puntos de emisión (Gunawardena et al., 2013). Por su parte, la *re-movilización de metales pesados* afecta la magnitud de la amenaza, al reincorporar contaminantes al sistema, elevando su carga activa (Donkor et al., 2005).

Variables como la *persistencia de metales pesados* y los *vertimientos de residuos peligrosos* también reflejan magnitud por su efecto acumulativo (Marrugo-Negrete; Pinedo-Hernández; Díez, 2017). La *expansión de la minería ilegal* se asocia a la extensión, ya que describe el comportamiento espacial del agente tensionante (Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible, 2019), mientras que *altos niveles de pluviosidad* y *aumento de temperatura* están ligados al tiempo, debido a su influencia en la frecuencia y duración de procesos hidrológicos y de movilización de contaminantes (Betancurth; Cañón, 2021; Marrugo-Negrete et al., 2023a). La *degradación geomorfológica del cauce*, al igual que los *pasivos mineros*, también se enmarcan en la magnitud del impacto físico inducido sobre el sistema

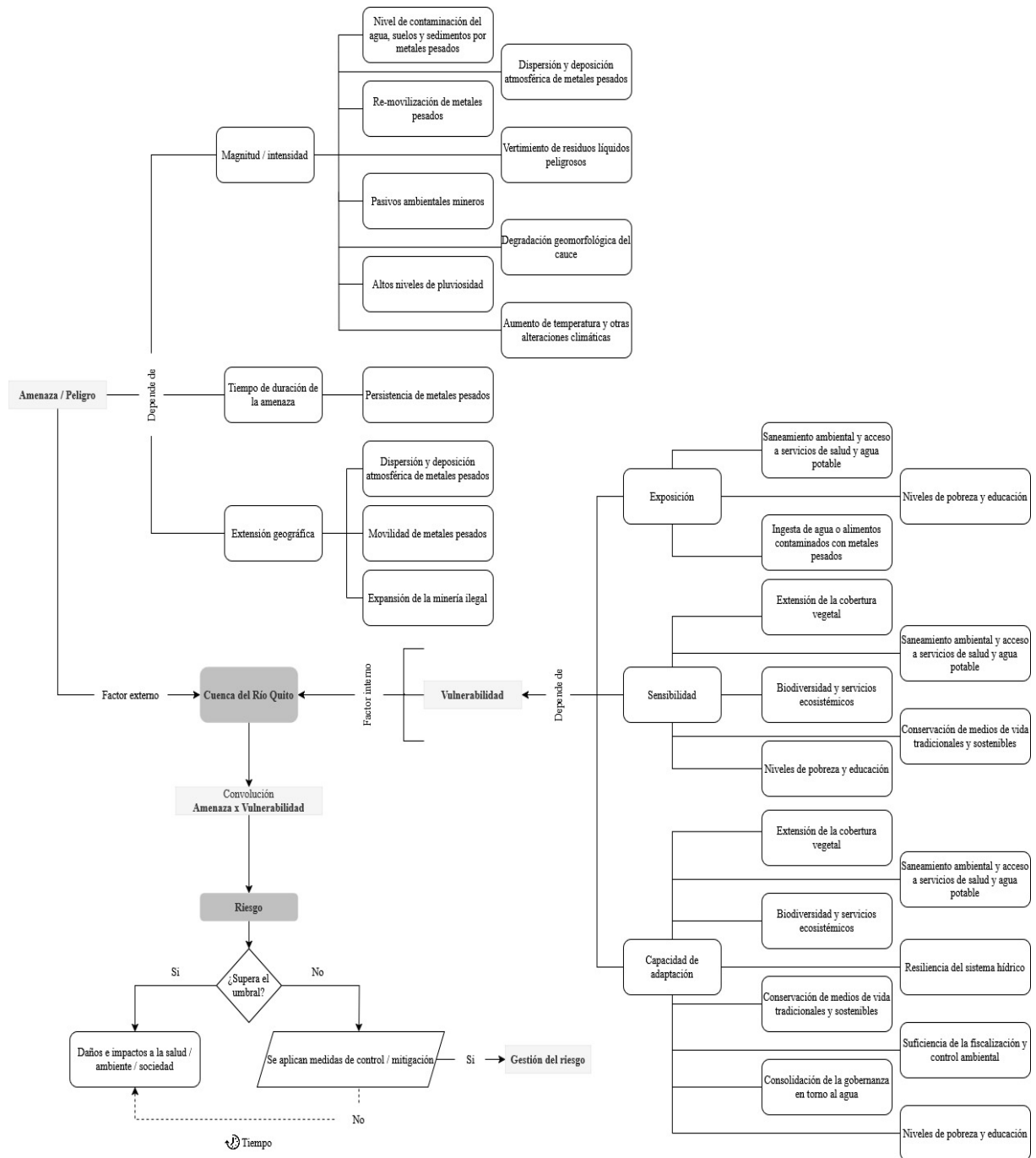
fluvial (Mount, 2020; Universidad de Córdoba; Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible; Fondo Colombia en Paz, 2023).

En cuanto a las variables asociadas a la vulnerabilidad, la asignación obedece a su papel en la configuración interna del sistema frente al riesgo, diferenciando entre exposición, sensibilidad y capacidad de adaptación. Por ejemplo, la *ingesta de agua o alimentos contaminados* representa un caso claro de exposición directa a los contaminantes (Córdoba-Tovar et al., 2023a). El *saneamiento ambiental y el acceso a servicios básicos*, al estar relacionados con las condiciones que condicionan la exposición y la respuesta frente a ella, se vinculan con los tres componentes: Exposición, Sensibilidad y Capacidad de Adaptación (Roncancio; Cutter; Nardocci, 2020). Por su parte, la *biodiversidad y servicios ecosistémicos* y la *extensión de la cobertura vegetal* se asocian tanto a sensibilidad como a capacidad adaptativa, toda vez que su pérdida incrementa la fragilidad del ecosistema y limita su regeneración. La *movilidad de metales pesados* y la *resiliencia del sistema hídrico* se relacionan con sensibilidad, ya que representan condiciones inherentes al sistema que amplifican o atenúan los efectos de la contaminación (Palacios-Torres; Caballero-Gallardo; Olivero-Verbel, 2018).

Otras variables como la *conservación de medios de vida tradicionales*, la *consolidación de la gobernanza* y los *niveles de pobreza y educación* reflejan condiciones institucionales y sociales que afectan directamente la capacidad de adaptación, aunque para el caso de los niveles de pobreza, se asocia a los elementos de exposición y sensibilidad, pues esta condición en la cuenca del río Quito limita las opciones de protección individual y colectiva frente al riesgo (Melo-Ascencio, 2025).

La siguiente estructura sistémica es el resultado del análisis de los factores de amenaza y vulnerabilidad socioambiental en la cuenca del río Quito, y se plantea como un modelo conceptual para fortalecer la gestión de riesgos derivados de la contaminación por metales pesados en cuencas afectadas por minería ilegal.

Figura 26. Estructura sistémica propuesta



Fuente: Elaboración propia (2025)

La estructura sistémica integra de manera articulada los factores de amenaza y vulnerabilidad identificados en la cuenca del río Quito, con base en las relaciones etimológicas de los conceptos de amenaza, vulnerabilidad y riesgo y las variables priorizadas. Esta estructura se fundamenta en la comprensión del riesgo como el resultado de la interacción funcional de tipo convolutivo entre elementos externos (magnitud, tiempo y extensión de la amenaza) e

internos (exposición, sensibilidad y capacidad de adaptación del sistema). La sistematización de variables bajo estos componentes permitió representar gráficamente cómo se configura o genera el riesgo socioambiental derivado de la contaminación por metales pesados en el territorio, destacando la interdependencia entre procesos ecológicos, sociales e institucionales. En este sentido, la estructura propuesta se convierte en un modelo conceptual, que puede ser empleado como guía metodológica para definir qué variables deben ser evaluadas, cómo deben ser medidas, y en qué nivel deben ser priorizadas para la formulación de un instrumento de gestión integral del riesgo en cuencas afectadas por minería ilegal como la cuenca del río Quito. La funcionalidad de este modelo se sustenta en la integración de datos técnicos, percepciones locales y capacidades institucionales en un mismo marco de análisis, proporcionando insumos para el diseño de estrategias de gestión en contextos de alta complejidad socioambiental como el de esta cuenca.

8.3. CONSIDERACIONES FINALES

El proceso de priorización de los aspectos socioambientales mediante los criterios de relevancia, dependencia e integralidad, apoyado por la consulta experta y la aplicación del método de Borda, permitió filtrar y jerarquizar 58 variables en función de su capacidad para representar la complejidad del riesgo socioambiental derivado de la contaminación por metales pesados en la cuenca del río Quito. Esta evaluación reveló una alta consistencia en la identificación de aspectos clave como la afectación a la salud humana, la biodiversidad acuática, la bioacumulación de metales y la exposición humana, los cuales fueron reiteradamente valorados como altamente relevantes y dependientes dentro del sistema.

La incorporación de la matriz de impactos cruzados y su procesamiento mediante el software MICMAC permitió determinar con precisión las relaciones de influencia y dependencia entre los 45 aspectos priorizados. Esta herramienta permitió clasificar las variables en tres categorías funcionales: variables de entrada, variables de resultado y variables descartadas, atendiendo a su rol estructural dentro del sistema modelado. Las variables de entrada son aquellas que presentan alta capacidad de influencia sobre otras y, por tanto, constituyen el conjunto de insumos fundamentales para construir la estructura sistémica del riesgo. Entre estas destacan: la contaminación del agua y del suelo por metales pesados, la persistencia de metales en el ambiente, la movilización de metales por escorrentía, acidez e inundación, la exposición humana, y la existencia de fuentes de contaminación difusa.

Por su parte, las variables de resultado corresponden a aspectos que presentan alta dependencia, pero escasa capacidad de influencia, lo que implica que su comportamiento es determinado por la interacción de múltiples factores del sistema. Estas variables operan como indicadores de respuesta o efecto, útiles para cuantificar el riesgo en sus diferentes dimensiones. En esta categoría se ubicaron la afectación a la salud del ecosistema, la afectación a la calidad de vida, la alteración de condiciones físicas del medio, y el uso inadecuado de los recursos hídricos, entre otros. Su función principal dentro del modelo no es estructurar el sistema, sino reflejar sus efectos emergentes y facilitar el diseño de métricas de evaluación.

Las variables descartadas fueron excluidas de la estructura por presentar baja influencia y dependencia, lo cual limita su aporte analítico. Sin embargo, esta exclusión no implica necesariamente que sean irrelevantes desde el punto de vista técnico. En algunos casos, la eliminación obedeció a su redundancia o solapamiento con otras variables que concentran mayor poder estructurante. Por ejemplo, la variable “afectación a la salud humana” fue descartada por estar abarcada conceptualmente dentro de la variable “afectación a la calidad de vida”, que posee mayor grado de influencia y capacidad de integración. De igual forma, la “afectación a la biodiversidad acuática y terrestre local” se encuentra contenida en el aspecto más amplio de “afectación a la integridad y equilibrio del ecosistema”, lo que justifica su supresión en términos de eficiencia y no de irrelevancia.

La integración de este análisis permitió construir una estructura sistémica robusta, en la cual el riesgo es entendido como el resultado dinámico de la interacción funcional de tipo convolutivo, entre factores de amenaza y vulnerabilidad. Este modelo, fundamentado en el análisis etimológico y en la clasificación de variables según los elementos que conforman cada factor, es decir: magnitud, tiempo y extensión para la amenaza; y exposición, sensibilidad y capacidad de adaptación para la vulnerabilidad; permitió representar gráficamente los mecanismos de generación del riesgo en el territorio. A partir de esta lógica, se evidencian las rutas de contaminación, los procesos de movilización y persistencia de metales, y las condiciones sociales e institucionales que configuran los niveles de exposición y respuesta del sistema.

La estructura sistémica obtenida trasciende su valor explicativo para convertirse en un modelo conceptual que puede orientar y fortalecer los instrumentos de gestión del riesgo socioambiental en cuencas afectadas por minería ilegal. Su funcionalidad aplica en la selección de variables clave, mecanismos de monitoreo y priorización de acciones de intervención,

integrando dimensiones biofísicas, sociales e institucionales en un mismo marco analítico. De este modo, se configura como una herramienta útil para la planificación y toma de decisiones en escenarios de alta complejidad socio ecológica, promoviendo el diseño de estrategias de control, mitigación o adaptación del riesgo en el contexto específico de la cuenca del río Quito.

9. CONCLUSIONES DE LA INVESTIGACIÓN

La pregunta problema que se planteó responder a través de esta investigación fue ¿cómo se estructuran herramientas, instrumentos o modelos para la gestión de riesgos socioambientales, integrando la amenaza asociada a la contaminación por metales pesados y la vulnerabilidad socioambiental de esta cuenca hidrográfica afectada por la minería de oro ilegal? En este sentido los procedimientos metodológicos planteados en cada capítulo constituyeron la ruta para construir la estructura sistémica que se propone con el fin de fortalecer los instrumentos de gestión del riesgo en cuencas como el río Quito. Se validó en la literatura la relación de convolución entre los factores de amenaza y vulnerabilidad que determinan el riesgo, concluyendo que este debe ser entendido como el potencial de pérdida que puede ocurrirle a un sistema expuesto, considerando el ámbito económico, social, cultural, físico y ambiental.

Como parte del procedimiento metodológico orientado a la construcción de herramientas, instrumentos o modelos para la gestión del riesgo socioambiental, se planteó la necesidad de realizar una revisión bibliográfica sistemática. Esta revisión tuvo como objetivo identificar referencias científicas en las que se propusieran o aplicaran herramientas existentes útiles para el diagnóstico de la amenaza y la vulnerabilidad. El análisis de 98 artículos permitió identificar 66 herramientas orientadas al estudio de estos componentes del riesgo, así como 58 aspectos socioambientales relevantes. Se evidenció que la mayoría de los enfoques analizados priorizan variables fisicoquímicas y la estimación de concentraciones de metales pesados, las cuales son generalmente comparadas con valores normativos para construir índices de contaminación. Sin embargo, estas herramientas presentan limitaciones en términos de integralidad, ya que en su mayoría no incorporan variables sociales, económicas, políticas o territoriales.

De forma paralela, se llevó a cabo la caracterización de los factores de amenaza y vulnerabilidad en la cuenca del río Quito, mediante mesas de trabajo, recorridos de campo, análisis cartográfico, toma y análisis de muestras para determinación de metales pesados y

modelos del comportamiento hidráulico; esta caracterización permitió identificar la presencia de elementos potencialmente tóxicos, como mercurio, níquel y cromo en zonas de alta actividad minera al igual que una profunda crisis social y económica que afecta la calidad de vida de las comunidades. La complejidad multidimensional de la problemática que enfrenta la cuenca del río Quito hizo necesario el desarrollo de una estructura conceptual que permita abordar integralmente las interacciones entre amenaza y vulnerabilidad. Esta realidad territorial exigió la formulación del modelo sistémico que integrara variables fisicoquímicas, ecológicas, sociales y políticas, superando los enfoques unidimensionales predominantes en las herramientas que se identificaron en la revisión sistemática de la literatura. En este contexto, la estructura propuesta se constituye en un referente técnico y metodológico para la planificación ambiental y el diseño de instrumentos de gestión del riesgo con enfoque transdisciplinario, especialmente en cuencas hidrográficas sometidas a presiones intensas por actividades extractivas ilegales, como es el caso del río Quito.

Con base en estos insumos, se aplicó la metodología 3S para priorizar 45 aspectos socioambientales validados por expertos. A través del análisis estructural con MICMAC, se identificaron 21 variables clave que configuran una estructura sistémica del riesgo socioambiental, organizada según su nivel de influencia y dependencia. Esta estructura propuso que dichas variables sean abordadas de manera conjunta, bajo modelos integradores que representen sus interacciones críticas y define como cada una de ellas se asocia con la amenaza, vulnerabilidad y riesgo. De acuerdo con esto, los instrumentos de gestión del riesgo diseñados para cuencas hidrográficas afectadas por minería ilegal en Colombia pueden fundamentarse en el modelo conceptual propuesto, el cual permite identificar y jerarquizar las variables críticas que deben ser monitoreadas para una evaluación del riesgo coherente con las condiciones específicas de estos territorios. Esta estructura puede servir como soporte conceptual para la actualización de políticas públicas, guías técnicas y marcos normativos, orientados al fortalecimiento de la gestión integral de los riesgos socioambientales en el país.

El modelo conceptual desarrollado orienta la construcción de instrumentos para la gestión integral del riesgo, integrando los factores de amenaza y vulnerabilidad con un enfoque sistémico. Este enfoque busca sustentar la toma de decisiones en información que articule diagnósticos técnicos con elementos sociales, culturales, ecológicos y de gobernanza, considerando los conflictos socioeconómicos, los valores y tradiciones culturales, la gobernanza ambiental y las condiciones de salud humana, del ecosistema y de calidad de vida. En cuanto a la amenaza, esta debe incorporar variables relacionadas con el nivel de

contaminación, la re-movilización, persistencia y movilidad de los metales pesados, así como la influencia de variables climáticas sobre la dispersión de contaminantes y la dinámica territorial de expansión de la minería ilegal y los pasivos ambientales mineros. Por su parte la vulnerabilidad incluye la extensión y estado de la cobertura vegetal como barrera natural frente a procesos de degradación; las condiciones de saneamiento ambiental y el acceso a servicios básicos como salud y agua potable; la integridad de la biodiversidad y los servicios ecosistémicos; el riesgo por ingesta de agua o alimentos contaminados; la resiliencia del sistema hídrico; y la conservación de medios de vida tradicionales y sostenibles. Además, se integran factores institucionales y sociales como la suficiencia en los mecanismos de fiscalización y control ambiental, el nivel de consolidación de la gobernanza en torno al agua, y los niveles de pobreza y educación de la población.

En conclusión, la investigación permitió establecer una ruta metodológica para la estructuración de herramientas, instrumentos y/o modelos de gestión del riesgo socioambiental en la cuenca del río Quito, integrando de manera articulada los factores de amenaza por metales pesados y las condiciones de vulnerabilidad del sistema socioecológicos y reconociendo la multidimensionalidad del impacto ambiental por contaminación con metales pesados derivados de la minería aluvial de oro. Los pasos futuros a partir de la formulación de este modelo se orientan hacia su incorporación efectiva en el diseño y mejora de instrumentos de política pública para la gestión del riesgo socioambiental en territorios afectados por minería ilegal. Se espera que este modelo conceptual sirva como referente metodológico para fortalecer la toma de decisiones en el sector ambiental, promoviendo la integración de enfoques multidimensionales en planes, programas y marcos normativos, particularmente en cuencas hidrográficas con alta conflictividad socioecológica. Asimismo, se debe explorar la posibilidad de estructurar matemáticamente el modelo, de manera que se permita su operacionalización mediante herramientas computacionales y plataformas de análisis espacial.

10. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ADAMU, C. I.; NGANJE, T. N.; EDET, Aniekan. Heavy metal contamination and health risk assessment associated with abandoned barite mines in Cross River State, southeastern Nigeria. *Environmental Nanotechnology, Monitoring & Management*, v. 3, p. 10–21, maio 2015.
- ADDI-BEDIAKO, ABRAHAM; MALAKANE, KARABO. Preliminary Assessment of Chemical Elements in Sediments and Larvae of Gomphidae (Odonata) from the Blyde River of the Olifants River System, South Africa. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, v. 17, n. 21, p. 8135, 4 nov. 2020.
- ADDI-BEDIAKO, ABRAHAM; NUKERI, SOPHY; KEKANA, MILLICENT. Heavy metal and metalloid contamination in the sediments of the Spekboom River, South Africa. *Applied Water Science*, v. 11, n. 7, p. 133, jul. 2021.
- AFOLAYAN, DAVID OLUWASEGUN ET AL. Physicochemical Studies for Risk Identification, Assessment, and Characterization of Artisanal Barite Mining in Nigeria. *Sustainability*, v. 13, n. 23, p. 12982, 24 nov. 2021.
- AGARWAL, SHYAM KISHOR. Heavy metal pollution. [S.l.]: APH publishing, 2009. v. 4
- AHMAD, ANWAR. Atrato River: History, Features, Routes, Aids, Flora, Fauna. v. 1, n. 1, p. 8, 2023.
- AKTAR, PARVIN; MOONAJILIN, MST. Assessment of Water Quality Status of Turag River Due to Industrial Effluent. 3 set. 2017.
- ALMEIDA, LUTIANE QUEIROZ DE. Riscos ambientais e vulnerabilidades nas cidades brasileiras: conceitos, metodologias e aplicações. [S.l.]: Cultura Acadêmica Editora, 2012.
- AMERICAN PUBLIC HEALTH ASSOCIATION. Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater. 24. ed. [S.l.: S.n.].
- ANDALIA, RUBÉN CAÑEDO; LABRADA, ROBERTO RODRÍGUEZ; MONTEJO, MARILIS. Scopus: la mayor base de datos de literatura científica arbitrada al alcance de los países subdesarrollados. 2010.
- ANGEL-AMAYA, JENNIFER ET AL. Consideraciones sobre la minería en el departamento del Chocó y recomendaciones para mejorar la gestión. Cali, Colombia: Geopatrimonio – Universidad de Cartagena - IIAP - WWF, 2019.
- ANGELOVIČOVÁ, Lenka; FAZEKAŠOVÁ, Danica. Contamination of the soil and water environment by heavy metals in the former mining area of Rudňany (Slovakia). *Soil and Water Research*, v. 9, n. 1, p. 18–24, 31 mar. 2014.
- ANGILLIERI, MARIA YANINA ESPER; ESPEJO, KAREN; LARA, GABRIELA. Morfometría de cuencas como base en la evaluación de la susceptibilidad/peligrosidad por aluviones, caso de estudio: cuenca del río del agua, San Juan, Argentina. 2016.
- AQUINO, ALFONSO RODRIGUEZ ET AL. Vulnerabilidade ambiental. [S.l.]: São Paulo: Blucher, 2017. v. 1

- AREFIN, M. Taufique et al. Heavy Metal Contamination in Surface Water Used for Irrigation: Functional Assessment of the Turag River in Bangladesh. *Journal of Applied Biological Chemistry*, v. 59, n. 1, p. 83–90, 31 mar. 2016.
- ARIYANI, DWI ET AL. Contributing Factor Influencing Flood Disaster Using MICMAC (Ciliwung Watershed Case Study). *Jurnal Pengelolaan Sumberdaya Alam dan Lingkungan (Journal of Natural Resources and Environmental Management)*, v. 12, n. 2, p. 268–280, 1 jul. 2022.
- ARIYANI, NAFIAH; FAUZI, AKHMAD. Analysis of Strategic Variables for Ecotourism Development; an Application of Micmac. *South Asian Journal of Social Studies and Economics*, p. 1–12, 7 jun. 2019.
- ARMENDÁRIZ-VILLEGAS, ELISA JEANNEHT ET AL. Metal mining and natural protected areas in Mexico: Geographic overlaps and environmental implications. *Environmental Science & Policy*, v. 48, p. 9–19, abr. 2015.
- ASAMBLEA DEPARTAMENTAL DE CÓRDOBA. Plan de Desarrollo Departamental de Córdoba: Ahora le Toca a Córdoba: Oportunidades, Bienestar y Seguridad 2020– 2023. , 2020. Disponible en: <<https://www.cordoba.gov.co/documentos/452/plan-de-desarrollo-2020-2023-rendicion-de-cuentas/>>. Acceso el: 13 out. 2023
- ASPRILLA, HARRY EDUVAR MARTÍNEZ; CENTENO, DENNIS JOSÉ SALAZAR. Sustentabilidad, Transición Agroecológica y Plantas Útiles en Comunidades Negras de Río Quito (Colombia). 2023.
- ASPRILLA MOSQUERA, Geidy Jhoana. Análisis multitemporal de las características geomorfológicas de la cuenca río quito presionada por actividad minera. [S.l.]: Universidad de Manizales, 2019.
- ASPRILLA-CÓRDOBA, KEYRA LISETH; MONTENEGRO-MARTÍNEZ, GINO. Desigualdades sociales en salud: análisis de la región pacífica colombiana. *Salud UIS*, v. 54, n. 1, 29 jul. 2022.
- ASTUTI, RATNA DWI PUJI ET AL. Risk identification of heavy metals in well water surrounds watershed area of Pangkajene, Indonesia. *Gaceta Sanitaria*, v. 35, p. S33–S37, 2021.
- AVIGLIANO, ESTEBAN ET AL. Arsenic, selenium, and metals in a commercial and vulnerable fish from southwestern Atlantic estuaries: distribution in water and tissues and public health risk assessment. *Environmental Science and Pollution Research*, v. 26, n. 8, p. 7994–8006, mar. 2019.
- AYALA MOSQUERA, Helcías José. Chocó biogeográfico colombiano: entre el extractivismo, las carencias y el desafío hacia la sustentabilidad territorial. *Ciencia Latina Revista Científica Multidisciplinar*, v. 7, n. 1, p. 8080–8099, 4 mar. 2023.
- AYANTOBO. Gold mining in igun ijsha, southwest nigeria: impacts and implications for water quality. *American Journal of Environmental Sciences*, v. 10, n. 3, p. 289–300, 1 mar. 2014.

- AZHIKODAN, GUBASH; YOKOYAMA, KATSUhide. Erosion and sedimentation pattern of fine sediments and its physical characteristics in a macrotidal estuary. *Science of The Total Environment*, v. 753, p. 142025, jan. 2021.
- BALTAS, HASAN ET AL. A case study on pollution and a human health risk assessment of heavy metals in agricultural soils around Sinop province, Turkey. *Chemosphere*, v. 241, p. 125015, fev. 2020.
- BEGANI, ROSE K.; BEGANI, Alphonse Z. Alluvial Gold Mining Sites as Exposure Pathways for Methyl Mercury Toxicity in Children: A Systematic Review. *Health*, v. 09, n. 06, p. 930–941, 2017.
- BEGUM, WASEFA ET AL. A comprehensive review on the sources, essentiality and toxicological profile of nickel. *RSC Advances*, v. 12, n. 15, p. 9139–9153, 2022.
- BELYANOVSKAYA, ALEXANDRA ET AL. A regional approach for the calculation of characteristic toxicity factors using the USEtox model. *Science of The Total Environment*, v. 655, p. 676–683, mar. 2019.
- BENJUMEA-ARIAS, MARTHA; CASTAÑEDA, LEONEL; VALENCIA-ARIAS, ALEJANDRO. Structural Analysis of Strategic Variables through MICMAC Use: Case Study. *Mediterranean Journal of Social Sciences*, 5 jul. 2016.
- BERNHOF, ROBIN A. Mercury toxicity and treatment: a review of the literature. *Journal of environmental and public health*, v. 2012, 2012.
- BERTRAND, LIDWINA ET AL. Usefulness of a freshwater macrophyte (*Potamogeton pusillus*) for an environmental risk assessment in a multi-source contaminated basin. *Chemosphere*, v. 222, p. 1003–1016, maio 2019.
- BETANCURTH, LILIANA; CAÑÓN, JULIO. Recent sedimentary processes in the Atrato River Delta – Colombia based on physicochemical characterization of surface sediments. *CATENA*, v. 207, p. 105547, dez. 2021.
- BILAL, M. et al. Cadmium (Cd) influences calcium (Ca) levels in the skeleton of a freshwater fish *Channa gachua*. *Brazilian Journal of Biology*, v. 84, p. e264336, 2022.
- BOGARDI, JJ; BIRKMANN, J. Vulnerability Assessment: A First Step towards Sustainable Risk Reduction. IN MALZAHN, D. & PLAPP, T. In: proceedings for the international conference: disasters and society-from hazard assessment to risk reduction. *Anais...* 2004.
- BRIFFA, JESSICA; SINAGRA, EMMANUEL; BLUNDELL, RENALD. Heavy metal pollution in the environment and their toxicological effects on humans. *Heliyon*, v. 6, n. 9, p. e04691, set. 2020.
- CAICEDO-RIVAS, GABRIEL; SALAS-MORENO, MANUEL; MARRUGO-NEGRETÉ, JOSÉ. Health Risk Assessment for Human Exposure to Heavy Metals via Food Consumption in Inhabitants of Middle Basin of the Atrato River in the Colombian Pacific. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, v. 20, n. 1, p. 435, 27 dez. 2022.

- CALAO-RAMOS, CLELIA ET AL. Occupational human exposure to mercury in artisanal small-scale gold mining communities of Colombia. *Environment International*, v. 146, p. 106216, jan. 2021.
- CALOGIURI, GF; BONAMONTE, D. Nickel Hypersensitivity: A General Review on Clinical Aspects and Potential Co-Morbidities. *Journal of Allergy & Therapy*, v. 07, n. 05, 2016.
- CANADIAN COUNCIL OF MINISTERS OF THE ENVIRONMENT 2002. Canadian sediment quality guidelines for the protection of aquatic life: Summary tables. 2002.
- CANO FRANCO, Andrés. Garantías constitucionales del río Atrato como sujeto de derecho en Colombia. *Derechos y medios de protección. Vis Iuris*, p. 99–111, 17 nov. 2017.
- CANO LÓPEZ, Wilmar Alexander. Entre dragas y trasmallos: minería mecanizada y cambios en las actividades de pesca en comunidades negras de la cuenca media del río Atrato, Chocó, Colombia. *Revista Bioetnia*, v. 14, n. 1, p. 111–130, 15 dez. 2017.
- CAPANGPANGAN, REY Y. et al. Evaluation of potential ecological risk and contamination assessment of heavy metals in sediment samples using different environmental quality indices – a case study in Agusan River, Caraga Philippines. 2016.
- CARDONA, O. Medición de la gestión del riesgo en América Latina. 2008.
- CARDONA, OMAR. La necesidad de repensar de manera holística los conceptos de vulnerabilidad y riesgo “Una Crítica y una Revisión Necesaria para la Gestión”. In: INTERNATIONAL WORK-CONFERENCE ON VULNERABILITY IN DISASTER THEORY AND PRACTICE,. Anais... Wageningen, Holanda.: 2001. Disponible en: <<http://201.130.16.43/handle/20.500.11762/19852>>
- CASTRO, C. V. Optimizing nature-based solutions by combining social equity, hydro-environmental performance, and economic costs through a novel Gini coefficient. *Journal of Hydrology X*, v. 16, p. 100127, ago. 2022.
- CEREZINI, MONISE TERRA; HANAI, FREDERICO YURI. Gestão sustentável e integrada da água em bacias hidrográficas: 20 anos da lei das águas no Brasil. *Caminhos de Geografia*, v. 18, n. 64, p. 159–168, 30 dez. 2017.
- CEREZINI, MONISE TERRA; ROSSO, MAURICIO; HANAI, FREDERICO YURI. Ferramentas de planejamento e gestão de recursos hídricos: proposta metodológica para levantamento e análise. p. 8, 2017.
- CHAN, WING SZE ET AL. Metal accumulations in aquatic organisms and health risks in an acid mine-affected site in South China. *Environmental Geochemistry and Health*, v. 43, n. 11, p. 4415–4440, nov. 2021.
- CHARKIEWICZ, ANGELIKA EDYTA ET AL. Cadmium Toxicity and Health Effects—A Brief Summary. *Molecules*, v. 28, n. 18, p. 6620, 14 set. 2023.
- CHEN, GUANGJIE ET AL. Industrial arsenic contamination causes catastrophic changes in freshwater ecosystems. *Scientific Reports*, v. 5, n. 1, p. 17419, 30 nov. 2015.

- CISZEWSKI, DARIUSZ; GRYGAR, TOMÁŠ MATYS. A Review of Flood-Related Storage and Remobilization of Heavy Metal Pollutants in River Systems. *Water, Air, & Soil Pollution*, v. 227, n. 7, p. 239, jul. 2016.
- CLOQUELL-BALLESTER, VICENTE-AGUSTÍN ET AL. Indicators validation for the improvement of environmental and social impact quantitative assessment. *Environmental Impact Assessment Review*, v. 26, n. 1, p. 79–105, jan. 2006.
- COLOMBIA. Ley 1523 de 2012 por la cual Por la cual se adopta la política nacional de gestión del riesgo de desastres y se establece el Sistema Nacional de Gestión del Riesgo de Desastres y se dictan otras disposiciones. 2012.
- CONFORTO, EDIVANDRO CARLOS; AMARAL, DANIEL; SILVA, SERGIO. Roteiro para revisão bibliográfica sistemática: aplicação no desenvolvimento de produtos e gerenciamento de projetos. 2011.
- CONSANI, SIRIO ET AL. Metal transport and remobilisation in a basin affected by acid mine drainage: the role of ochreous amorphous precipitates. *Environmental Science and Pollution Research*, v. 24, n. 18, p. 15735–15747, jun. 2017.
- CORIA, IGNACIO DANIEL. El estudio de impacto ambiental: características y metodologías. p. 12, 2008. CORPORACIÓN AUTÓNOMA REGIONAL DE CUNDINAMARCA CAR. Evaluación de la amenaza, la vulnerabilidad y el riesgo por cambio climático y para la elaboración del plan de adaptación en cuencas hidrográficas. , 2021. Disponible en: <<https://www.car.gov.co/uploads/files/628b9ad100608.pdf>>
- CORREA-CASELLES, DANIELA; CAMACHO, LUIS A.; FERNANDEZ, Nicolas. A Modeling Framework to Estimate the Transport and Fate of Mercury in Nationwide Surface Waters. *Water*, v. 17, n. 2, p. 250, 17 jan. 2025.
- CORTE CONSTITUCIONAL DE COLOMBIA. Sentencia T-622 de 2016. T-622, 2016. Disponible en: <<https://www.corteconstitucional.gov.co/relatoria/2016/t-622-16.htm>>. Acceso el: 24 jan. 2024
- COSTA, MAX. Molecular mechanisms of nickel carcinogenesis. *Review of Education, Pedagogy, and Cultural Studies*, v. 17, n. 1, p. 1–6, jan. 1995.
- CRICHTON, DAVID. The risk triangle. *Natural disaster management*, v. 102, n. 3, p. 102–103, 1999.
- CUTTER, SUSAN L. Vulnerability to environmental hazards. *Progress in Human Geography*, v. 20, n. 4, p. 529–539, 1 dez. 1996a.
- CUTTER, SUSAN L. Vulnerability to environmental hazards. *Progress in Human Geography*, v. 20, n. 4, p. 529–539, 1 dez. 1996b.
- DEFENSORÍA DEL PUEBLO. Problemática humanitaria en la región Pacífica colombiana. , 2016. Disponible en: <<https://www.acnur.org/fileadmin/Documentos/Publicaciones/2017/11053.pdf>>

- CÓRDOBA-TOVAR, LEONOMIR ET AL. Ecological and human health risk from exposure to contaminated sediments in a tropical river impacted by gold mining in Colombia. *Environmental Research*, v. 236, p. 116759, nov. 2023.
- DELPLA, IANIS ET AL. A Decision Support System for Drinking Water Production Integrating Health Risks Assessment. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, v. 11, n. 7, p. 7354–7375, 18 jul. 2014.
- DICTORO, VINICIUS PEREZ; YURI HANAI, FREDERICO. Indicadores de educação ambiental para bacias hidrográficas: revisão, proposição e validação. *Pesquisa em Educação Ambiental*, v. 18, n. 1, 25 set. 2023.
- DINAR, ARIEL. Challenges to Water Resource Management: The Role of Economic and Modeling Approaches. *Water*, v. 16, n. 4, p. 610, 18 fev. 2024.
- DONKOR, AUGUSTINE K. et al. Heavy Metals in Sediments of the Gold Mining Impacted Pra River Basin, Ghana, West Africa. *Soil and Sediment Contamination: An International Journal*, v. 14, n. 6, p. 479–503, nov. 2005.
- DOWNING, THOMAS E. Vulnerability to hunger in Africa. *Global Environmental Change*, v. 1, n. 5, p. 365–380, dez. 1991. DRAGOVIĆ, S.; MIHAILOVIĆ, N.; GAJIĆ, B. Heavy metals in soils: Distribution, relationship with soil characteristics and radionuclides and multivariate assessment of contamination sources. *Chemosphere*, v. 72, n. 3, p. 491–495, jun. 2008.
- ECHAVARRÍA-RENTERÍA, YEICY LORENA; HINESTROZA-CUESTA, LISNEIDER. Judicialización de los conflictos ambientales en el departamento del Chocó: ríos de mercurio. *IUSTA*, n. 55, 1 jul. 2021.
- EFFAH, ELIZABETH ET AL. Human health risk assessment from heavy metals in three dominant fish species of the Ankobra river, Ghana. *Toxicology Reports*, v. 8, p. 1081–1086, 2021.
- EGBUERI, JOHNBOSCO C.; MGBENU, Chukwuma N. Chemometric analysis for pollution source identification and human health risk assessment of water resources in Ojoto Province, southeast Nigeria. *Applied Water Science*, v. 10, n. 4, p. 98, abr. 2020.
- EISLER, RONALD. Arsenic Hazards to Humans, Plants, and Animals from Gold Mining. In: WARE, George W. et al. (Eds.). *Reviews of Environmental Contamination and Toxicology*. Reviews of Environmental Contamination and Toxicology. New York, NY: Springer New York, 2004. v. 180 p. 133–165.
- EL-AMIER, YASSER A. et al. Ecological Risk Assessment of Heavy Metals along Three Main Drains in Nile Delta and Potential Phytoremediation by Macrophyte Plants. *Plants*, v. 9, n. 7, p. 910, 18 jul. 2020.
- EL-SAADANI, ZOZO ET AL. Environmental Geochemistry and Fractionation of Cadmium Metal in Surficial Bottom Sediments and Water of the Nile River, Egypt. *Toxics*, v. 10, n. 5, p. 221, 28 abr. 2022.

- ELHADDAD, ENGY ET AL. Risk Assessment and Hazardous Effects of Metal Contamination in *O. niloticus* and *S. galilaeus* from Four Islands of the River Nile. *Bulletin of Environmental Contamination and Toxicology*, v. 109, n. 5, p. 839–851, nov. 2022.
- ELHAG, MOHAMED ET AL. Olive Mill Waste Water Risk Assessment Based on GIS Techniques in Crete, Greece. *Global Nest Journal*, v. 19, p. 82–93, 2017.
- ELHATIP, H.; HINIS, M. Statistical approaches for estimating the environmental flows in a river basin: case study from the Euphrates River catchment, Eastern Anatolian part of Turkey. *Environ Earth Sci*, v. 73, p. 4633–4646, 2015.
- ELLISON, JOANNA C. Vulnerability assessment of mangroves to climate change and sea-level rise impacts. *Wetlands Ecology and Management*, v. 23, n. 2, p. 115–137, abr. 2015.
- ENUNEKU, ALEX ET AL. Evaluating the potential health risks of heavy metal pollution in sediment and selected benthic fauna of Benin River, Southern Nigeria. *Applied Water Science*, v. 8, n. 8, p. 224, dez. 2018.
- EPA, US. Method 3051A (SW-846): microwave assisted acid digestion of sediments, sludges, and oils, revision 1. Washington, DC, 2007.
- ESTUARDO-CEVALLOS, GABRIEL; ROLDAN-RUENES, AMÍLCAR; DE CUBA, SANTIAGO. Prospective identification of components in the process of environmental management at la Concordia Canton, Ecuador. n. 3, p. 16–33, 2015.
- FERRARI, ROSSELLA. Writing narrative style literature reviews. *Medical Writing*, v. 24, n. 4, p. 230–235, dez. 2015.
- FONDO COLOMBIA EN PAZ; UNIVERSIDAD DE CÓRDOBA; MINISTERIO DE AMBIENTE Y DESARROLLO SOSTENIBLE. Informe final del convenio 705 de 2021: Generación de insumos técnicos y de apropiación social para el diseño de la estrategia de rehabilitación y/o restauración ecológica de la cuenca del río Quito, en el marco de la sentencia T-622 de 2016. 2023.
- FOSTER, I. D. L.; CHARLESWORTH, S. M. Heavy metals in the hydrological cycle: Trends and explanation. *Hydrological Processes*, v. 10, n. 2, p. 227–261, fev. 1996.
- GAILLARD, JEAN-CHRISTOPHE; KELMAN, ILAN; WISNER, BENJAMIN (ORGS.). *The Routledge handbook of hazards and disaster risk reduction*. First edition ed. New York: Routledge, 2012.
- GALLEGO RÍOS, Sara E. et al. Evaluation of Mercury, Lead, Arsenic, and Cadmium in Some Species of Fish in the Atrato River Delta, Gulf of Urabá, Colombian Caribbean. *Water, air, and soil pollution*, v. 229, n. 8, p. 1–13, 2018a. GALLEGOS RÍOS, Sara E. et al. Evaluation of Mercury, Lead, Arsenic, and Cadmium in Some Species of Fish in the Atrato River Delta, Gulf of Urabá, Colombian Caribbean. *Water, Air, & Soil Pollution*, v. 229, n. 8, p. 275, ago. 2018b.
- GALLO, LINA MARCELA. ¿Cómo reducir los impactos de la minería en el Chocó? Disponible en: <https://www.udea.edu.co/wps/portal/udea/web/inicio/udea-noticias/udea-noticia/!ut/p/z0/fUy9DoIwEH4VF8bmKmLVkTiYGAcHY6CLuZRGtmkPSjE-vqCLLi5fvn_QUID2-KArRmKPzahLrS7rzTad55k8SJUpmatjtlylu8XpLGEP-n9hfKBb1-

- ketGEf7TNC0XKI2AyVxURi_6tqdvbDJ5x5jmQI-0S-154qnlpfNlk_sil3LIKtBkNBkGvRRO6FI28DoTA1G4b2rssXZgV6Zg!!/>. Acceso el: 10 jan. 2022.
- GARCÍA JURADO, Mayra Alejandra; SOTO URREA, Wilson Hernando. Retrato de la cuenca media-alta del río Atrato, una aproximación desde la historia ambiental. *Nova*, v. 21, n. 40, p. 41–56, 1 maio 2023.
- GARCÍA SÁNCHEZ, Andrés. Comunidades negras, paz territorial y resistencias en el río Atrato. *Tabula Rasa*, n. 41, p. 47–71, 27 abr. 2022.
- GARDENIER, JOHN; KEEY, ROGER B. Risk assessment of industrial and natural hazards. 1992.
- GAVIRIA, SERGIO; ANGEL-AMAYA, JENNIFER. Geoindicadores aplicados al estudio de los efectos ambientales de la explotación de oro aluvial en la cuenca baja del río Quito, Chocó (Colombia). *Gestión y Ambiente*, v. 22, n. 2, p. 235–256, 1 jul. 2020.
- GEBREYOHANNES, FTSUM ET AL. Investigations of Physico-Chemical Parameters and its Pollution Implications of Elala River, Mekelle, Tigray, Ethiopia. *Momona Ethiopian Journal of Science*, v. 7, n. 2, p. 240–257, 2015.
- GENTILE, J. H. et al. Ecological conceptual models: a framework and case study on ecosystem management for South Florida sustainability. *Science of The Total Environment*, v. 274, n. 1–3, p. 231–253, jul. 2001.
- GIRARDI, RUBIA ET AL. Water quality change of rivers during rainy events in a watershed with different land uses in Southern Brazil. *RBRH*, v. 21, p. 514–524, set. 2016.
- GOBERNACIÓN DEL CHOCÓ. Plan departamental de desarrollo del Chocó 2020-2023. , 2020. Disponible en: <<https://www.choco.gov.co/planes/plan-de-desarrollo-departamental-2020-2023-generando>>
- GODT, JOHANNES ET AL. The toxicity of cadmium and resulting hazards for human health. *Journal of Occupational Medicine and Toxicology*, v. 1, n. 1, p. 22, dez. 2006.
- GONZÁLEZ-MORALES, MARÍA; FERNÁNDEZ-POZO, LUIS; RODRÍGUEZ-GONZÁLEZ, MA ÁNGELES. Threats of metal mining on ecosystem services. Conservation proposals. *Environmental research*, v. 214, n. Journal Article, p. 114036, 2022a.
- GONZÁLEZ-SERRANO, MARÍA XIMENA. Rights of nature, an ornamental legal framework: water extractivism and backbone rivers with rights in Colombia. *The Journal of Peasant Studies*, v. 52, n. 2, p. 322–342, 23 fev. 2025.
- GOYAL, V. C. et al. Appraisal of heavy metal pollution in the water resources of Western Uttar Pradesh, India and associated risks. *Environmental Advances*, v. 8, p. 100230, jul. 2022.
- GRANDA-ORIVE, JOSÉ IGNACIO ET AL. Ciertas ventajas de Scopus sobre Web of Science en un análisis bibliométrico sobre tabaquismo. *Revista Española de Documentación Científica*, v. 36, n. 2, p. 11, 2013.

- GRAVELINE, MARIE-HÉLÈNE; GERMAIN, DANIEL. Disaster Risk Resilience: Conceptual Evolution, Key Issues, and Opportunities. *International Journal of Disaster Risk Science*, v. 13, n. 3, p. 330–341, jun. 2022. GRUPO BANCO MUNDIAL. Agua. Disponible en: <<https://www.bancomundial.org/es/topic/water/overview>>
- GUERRERO, SANTIAGO EDUARDO PABÓN ET AL. Contaminación del agua por metales pesados, métodos de análisis y tecnologías de remoción. Una revisión. *Entre Ciencia e Ingeniería*, v. 14, n. 27, p. 9–18, 19 jul. 2020.
- GUERRERO-DE LEÓN, Aída Alejandra et al. Gobernanza y participación social en la gestión del agua en la microcuenca El Cangrejo, en el municipio de Autlán de Navarro, Jalisco, México. *Economía Sociedad y Territorio*, 1 maio 2010.
- GUMEL, DANLADI YUSUF. Assessing Climate Change Vulnerability: A Conceptual and Theoretical Review. 19 fev. 2022.
- GUNAWARDENA, JANAKA ET AL. Atmospheric deposition as a source of heavy metals in urban stormwater. *Atmospheric Environment*, v. 68, p. 235–242, abr. 2013.
- GUPTA, DHARMENDRA K. et al. Arsenic Contamination from Historical Aspects to the Present. In: GUPTA, Dharmendra Kumar; CHATTERJEE, Soumya (Orgs.). *Arsenic Contamination in the Environment*. Cham: Springer International Publishing, 2017. p. 1–12.
- GUPTA, PANKAJ; CHANJTA, AMIT; MEHTA, YOGESH. Environmental toxicology. [S.l.]: CRC Press, 2023. GWP. Guía para la aplicación de la Gestión Integrada del Recurso Hídrico (GIRH) a nivel municipal. 2013. Disponible en: <https://www.gwp.org/globalassets/global/gwp-cam_files/guia-girh-a-escala-municipal.pdf>
- GÓMEZ, MARIBEL ARANGO. LA MINERÍA TRADICIONAL EN COLOMBIA Y SU CRIMINALIZACIÓN ¿Qué efectos ejerce el derecho positivo en la minería tradicional? 2021.
- HAGHNAZAR, HAMED ET AL. Potentially toxic elements contamination in surface sediment and indigenous aquatic macrophytes of the Bahmanshir River, Iran: Appraisal of phytoremediation capability. *Chemosphere*, v. 285, p. 131446, dez. 2021.
- HAN, RURU; ZHOU, BEIHAI; CHEN, HUILUN. Spatio-Temporal Distribution of Environmental Health Risk of Heavy Metals in Industrial Wastewater of China during 1999–2018. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, v. 18, n. 11, p. 5920, 31 maio 2021.
- HASAN, G. M. M. Anwarul et al. Distribution of Cr, Cd, Cu, Pb and Zn in organs of three selected local fish species of Turag river, Bangladesh and impact assessment on human health. *Emerging Contaminants*, v. 9, n. 1, p. 100197, mar. 2023.
- HASSAAN, MOHAMED A.; NEMR, Ahmed El; MADKOUR, Fedekar F. Environmental Assessment of Heavy Metal Pollution and Human Health Risk. 2016.
- HERNÁNDEZ OSPINA, Mónica Patricia. Formas de territorialidad española en la Gobernación del Chocó durante el siglo XVIII. *Historia Crítica*, n. 32, p. 12–37, jul. 2006.

- HIDAYATI, NUNING VITA ET AL. Assessment of the ecological and human health risks from metals in shrimp aquaculture environments in Central Java, Indonesia. *Environmental Science and Pollution Research*, v. 27, n. 33, p. 41668–41687, nov. 2020.
- HILSON, GAVIN. The environmental impact of small-scale gold mining in Ghana: identifying problems and possible solutions. *The Geographical Journal*, v. 168, n. 1, p. 57–72, mar. 2002.
- HOSSAIN, M. N. et al. Comparative seasonal assessment of pollution and health risks associated with heavy metals in water, sediment and Fish of Buriganga and Turag River in Dhaka City, Bangladesh. *SN Applied Sciences*, v. 3, n. 4, abr. 2021.
- HU, PAN ET AL. Flood-induced mortality across the globe: Spatiotemporal pattern and influencing factors. *Science of The Total Environment*, v. 643, p. 171–182, dez. 2018.
- HUANG, XUEXIA ET AL. Distribution, Source and Risk Assessment of Heavy Metal(oid)s in Water, Sediments, and Corbicula Fluminea of Xijiang River, China. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, v. 16, n. 10, p. 1823, 23 maio 2019.
- HUDSON, EMILY ET AL. Integrated Hydrological and Geophysical Characterisation of Surface and Subsurface Water Contamination at Abandoned Metal Mines. *Water, Air, & Soil Pollution*, v. 229, n. 8, p. 256, ago. 2018b.
- HUDSON, EMILY ET AL. Integrated Hydrological and Geophysical Characterisation of Surface and Subsurface Water Contamination at Abandoned Metal Mines. *Water, air, and soil pollution*, v. 229, n. 8, p. 256–14, 2018a.
- HUNG, CHIH-HSUAN; HUNG, HUNG-CHIH; HSU, MU-CHIEN. Linking the interplay of resilience, vulnerability, and adaptation to long-term changes in metropolitan spaces for climate-related disaster risk management. *Climate Risk Management*, v. 44, p. 100618, 2024.
- IDEAM. ATLAS CLIMATOLÓGICO DE COLOMBIA. Disponible en: <<http://www.ideam.gov.co/AtlasWeb/>>. Acceso el: 17 jan. 2022.
- IMRAN, UZMA ET AL. Health risk assessment of the exposure of heavy metal contamination in surface water of lower Sindh, Pakistan. *SN Applied Sciences*, v. 1, n. 6, p. 589, jun. 2019.
- INSTITUTION OF PROFESSIONAL ENGINEERS NEW ZEALAND. Engineering risk: Report of the President's task committee on professional practice and risk. [S.l.]: Institution of Professional Engineers New Zealand, 1984.
- INSTITUTO GEOGRÁFICO AGUSTÍN CODAZZI. Estudio General de Suelos y Zonificación de Tierras Departamento de Chocó Escala 1:100.000. Bogotá D. C.: [S.n.].
- IORDACHE, MIHAELA ET AL. Assessment of Heavy Metals Pollution in Sediments from Reservoirs of the Olt River as Tool for Environmental Risk Management. *Revista de Chimie*, v. 70, n. 12, p. 4153–4162, 19 jan. 2020. IPCC (ORG.). Impacts, adaptation, and vulnerability. Cambridge: Cambridge Univ. Press, 2001.
- ISLAM, MD. Saiful; AHMED, Md. Kawser; HABIBULLAH-AL-MAMUN, Md. Heavy metals in sediment and their accumulation in commonly consumed fish species in

- Bangladesh. Archives of Environmental & Occupational Health, v. 72, n. 1, p. 26–38, 2 jan. 2017.
- JAISWAL, MANEESH ET AL. Heavy metal contamination in the complete stretch of Yamuna river: A fuzzy logic approach for comprehensive health risk assessment. PLOS ONE, v. 17, n. 8, p. e0272562, 8 ago. 2022.
- JAWAD-UL-HAQUE et al. Effects of COVID-19 era on a subtropical river basin in Bangladesh: Heavy metal(loid)s distribution, sources and probable human health risks. Science of The Total Environment, v. 857, p. 159383, jan. 2023.
- JIANG, MENGYU ET AL. Spatiotemporal variation and ecological risk assessment of sediment heavy metals in two hydrologically connected lakes. Frontiers in Ecology and Evolution, v. 10, p. 1005194, 14 set. 2022.
- JIMENEZ-ORTEGA, ALEX ET AL. Plan de ordenamiento del recurso hídrico del río Quito y sus principales tributarios: los ríos Certeguí y San Pablo, departamento del Chocó, Colombia. [S.l.: S.n.].
- KANG, MENGXIN ET AL. Spatial distribution characteristics and health risk assessment of heavy metals in surface sediment of the Hai River and its tributaries in Tianjin, China. Water Science and Technology, v. 84, n. 6, p. 1487–1497, 15 set. 2021.
- KARIMI, S. et al. Comparative assessment of environmental flow using hydrological methods of low flow indexes, Smakhtin, Tennant and flow duration curve. Acta Geophysica, v. 69, p. 285–293, 2021.
- KATES, ROBERT W.; AUSUBEL, Jesse H.; BERBERIAN, Mimi. The interaction of climate and society. Massachusetts, USA: [S.n.].
- KELLY, P. M.; ADGER, W. N. Theory and Practice in Assessing Vulnerability to Climate Change and Facilitating Adaptation. 2000.
- KENNON, NICOLE; HOWDEN, PETER; HARTLEY, MEREDITH. Who Really Matters?: A Stakeholder Analysis Tool. v. 5, n. 2, 2009.
- KHAN, FAISAL ET AL. Dynamic risk management: a contemporary approach to process safety management. Current Opinion in Chemical Engineering, v. 14, p. 9–17, nov. 2016.
- KHANNA, NEHA. Measuring environmental quality: an index of pollution. Ecological Economics, v. 35, n. 2, p. 191–202, nov. 2000.
- KICIŃSKA, Alicja; POMYKAŁA, Radosław; IZQUIERDO-DIAZ, Miguel. Changes in soil pH and mobility of heavy metals in contaminated soils. European Journal of Soil Science, v. 73, n. 1, p. e13203, 2022.
- KIMBROUGH, DAVID EUGENE ET AL. A Critical Assessment of Chromium in the Environment. Critical Reviews in Environmental Science and Technology, v. 29, n. 1, p. 1–46, jan. 1999.
- KOJOLA, ERIK; PELLOW, DAVID N. New directions in environmental justice studies: examining the state and violence. Environmental Politics, v. 30, n. 1–2, p. 100–118, 23 fev. 2021.

- KORÇA, Bardha; DEMAKU, Skender. Evaluation of Water Quality and Its Potential Threats Along River Drini Bardh Using Analytical Instrumental Techniques. *Polish Journal of Environmental Studies*, v. 31, n. 4, p. 3163–3172, 20 jun. 2022.
- KUMAR, C. P. Status and mitigation of arsenic contamination in groundwater in India. *Environmental Sciences*, v. 1, n. 1, 2015.
- LAME, GUILLAUME. Systematic Literature Reviews: An Introduction. *Proceedings of the Design Society: International Conference on Engineering Design*, v. 1, n. 1, p. 1633–1642, jul. 2019.
- LARA RODRÍGUEZ, Juan Sebastián; TOSI FURTADO, André; ALTIMIRAS MARTIN, Aleix. Minería del platino y el oro en Chocó: pobreza, riqueza natural e informalidad. *Revista de Economía Institucional*, v. 22, n. 42, p. 241–268, 20 nov. 2019.
- LEONE, FRÉDÉRIC; VINET, FREDDY. La vulnérabilité, un concept fondamental au coeur des méthodes d'évaluation des risques naturels. [S.l.]: Université Paul - Valéry Mont Pellier 3, 2006.
- LEVY, YAIR; ELLIS, TIMOTHY J. A systems approach to conduct an effective literature review in support of information systems research. *Informing Science*, v. 9, 2006.
- LIKERT, R. A technique for the measurement of attitudes. v. 22, n. 140, p. 55, 1932.
- LIM, KAH YEE; FOO, KENG YUEN. Hazard identification and risk assessment of the organic, inorganic and microbial contaminants in the surface water after the high magnitude of flood event. *Environment international*, v. 157, n. Journal Article, p. 106851, 2021.
- LINKOV, I. et al. Multicriteria Decision Analysis: A Comprehensive Decision Approach for Management of Contaminated Sediments. *Risk Analysis*, v. 26, n. 1, p. 61–78, fev. 2006.
- LINO, AS ET AL. Total and methyl mercury distribution in water, sediment, plankton and fish along the Tapajós River basin in the Brazilian Amazon. *Chemosphere*, v. 235, p. 690–700, 2019.
- LIU, JING ET AL. Quantifying and predicting ecological and human health risks for binary heavy metal pollution accidents at the watershed scale using Bayesian Networks. *Environmental Pollution*, v. 269, p. 116125, jan. 2021.
- LIVERMAN, DIANA M. Vulnerability to global environmental change. In: *Global environmental risk*. [S.l.]: Routledge, 2001. p. 201–216.
- LLORENTE-VALBUENA, A. M.; FIERRO-MORALES, J. Evaluación preliminar de calidad de agua superficial en zonas afectadas por el proyecto carbonífero el Cerrejón. *Corporación Geoambiental Terrae.*, , 2019.
- LU, YONGLONG ET AL. Impacts of soil and water pollution on food safety and health risks in China. *Environment International*, v. 77, p. 5–15, abr. 2015.
- MADANIAN, SHARAREH; COSTA, CARLOS SMANIOTTO. A model for evaluating a greenbelt planning in the city of Qazvin (Iran) using MICMAC method. *Modeling Earth Systems and Environment*, v. 3, n. 4, p. 1503–1513, dez. 2017.

- MAFTEI, ANDREEA E. et al. Spatial Distribution of Minor Elements in the Tazlău River Sediments: Source Identification and Evaluation of Ecological Risk. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, v. 16, n. 23, p. 4664, 2019a.
- MAFTEI, ANDREEA E. et al. Spatial Distribution of Minor Elements in the Tazlău River Sediments: Source Identification and Evaluation of Ecological Risk. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, v. 16, n. 23, p. 4664, 22 nov. 2019b.
- MAO, CHANGPING ET AL. Spatial Distribution and Ecological Risk Assessment of Heavy Metals in the Sediment of a Tropical Mangrove Wetland on Hainan Island, China. *Water*, v. 14, n. 22, p. 3785, 21 nov. 2022a.
- MARIANO, ARI MELO; SANTOS, MAÍRA ROCHA. *Revisão da Literatura: Apresentação de uma Abordagem Integradora*. 2017.
- MARRUGO-MADRID, SIDAY ET AL. Assessment of dissolved mercury by diffusive gradients in thin films devices in abandoned ponds impacted by small scale gold mining. *Environmental Research*, v. 208, p. 112633, maio 2022.
- MARRUGO-NEGRETE, JOSE; BENITEZ, LUIS NORBERTO; OLIVERO-VERBEL, JESÚS. Distribution of mercury in several environmental compartments in an aquatic ecosystem impacted by gold mining in northern Colombia. *Archives of environmental contamination and toxicology*, v. 55, p. 305–316, 2008.
- MARRUGO-NEGRETE, JOSÉ ET AL. Detecting mass sediment transport and movement tainted by decades of mining activities in river Quito, Western Colombia. *Journal of Cleaner Production*, v. 394, p. 136293, mar. 2023a.
- MARRUGO-NEGRETE, JOSÉ ET AL. Evaluating ecological risks and metal bioavailability in post-dredging sediments of a wetland affected by artisanal gold mining. *Science of The Total Environment*, v. 955, p. 176309, dez. 2024.
- MARRUGO-NEGRETE, JOSÉ ET AL. Vertical distribution and trace element contamination in sediment cores affected by gold mining in Colombia. *Chemosphere*, v. 340, p. 139744, nov. 2023b.
- MARRUGO-NEGRETE, JOSÉ; PINEDO-HERNÁNDEZ, JOSÉ; DÍEZ, SERGI. Assessment of heavy metal pollution, spatial distribution and origin in agricultural soils along the Sinú River Basin, Colombia. *Environmental Research*, v. 154, p. 380–388, abr. 2017.
- MARSHALL, BRUCE G. et al. Evidence of transboundary mercury and other pollutants in the Puyango-Tumbes River basin, Ecuador–Peru. *Environmental Science: Processes & Impacts*, v. 20, n. 4, p. 632–641, 2018.
- MARSIGLIA LANS, Mario Alberto et al. Water quality and heavy metal levels in the Sinú River, a drinking water source in the Colombian Caribbean. *Universitas Scientiarum*, v. 28, n. 2, p. 165–182, 23 jun. 2023.
- MARTÍNEZ MACEA, María Alejandra. *Exposición a mercurio y plomo en población de 5 a 15 años debido al consumo de agua y alimentos contaminados en la región de La Mojana. Maestría en ciencias ambientales—[S.l.]: Universidad de Córdoba, 2021.*

- MARTÍNEZ, POLIOPTRO; REYNA, FERNANDO. Gobernanza, reflexiones desde la gestión pública. In: La gobernanza del agua: un desafío actual. Hacia una mirada crítica del concepto y de su aplicación. Instituto Mexicano de Tecnología del Agua ed. Jiutepec: [S.n.]. p. 17–38.
- MCDONALD, GAVIN WADE ET AL. Case Study of Collaborative Modeling in an Indigenous Community. *Water*, v. 14, n. 17, p. 2601, 24 ago. 2022.
- MCNEILL, JOHN ROBERT. Naturaleza y cultura de la historia ambiental. 2005. Disponible en: <<https://dialnet.unirioja.es/servlet/articulo>
- MELO-ASCENCIO, DIEGO ALEJANDRO. Alluvial gold exploitation along the Quito River: Dredgers and the operations of racial capitalism through social reproduction. *Environment and Planning D: Society and Space*, p. 02637758251349586, 18 jun. 2025.
- MELO-ASCENCIO, DIEGO. A Postcolonial Marxist Critique of the River-as-Subject: Situating the Atrato River in Its Development Aporias. v. 0, p. 21, 2024.
- MENA, ALEXANDER RODRÍGUEZ; AGUILLÓN, ÁLVARO CANO. Política pública de la naturaleza con enfoque diferencial en las comunidades negras de Medio Atrato -Beté, Chocó, Colombia. Maestría en Gobierno, Políticas públicas y Desarrollo territorial—[S.l.]: Universidad Nacional Abierta y a Distancia - UNAD, 2025.
- MENA PALACIOS, Denier; MORENO RODALLEGA, Maryuri. Medidas de mitigación y corrección que utiliza el estado para subsanar los daños producidos por los entables mineros en el barrio Oasis del municipio de Certegui departamento del Chocó. Tesis de pregrado—[S.l.]: Universidad Cooperativa de Colombia, 2019.
- MESTANZA-RAMÓN, CARLOS ET AL. Gold Mining in the Amazon Region of Ecuador: History and a Review of Its Socio-Environmental Impacts. *Land*, v. 11, n. 2, p. 221, 1 fev. 2022. MILLENNIUM ECOSYSTEM ASSESSMENT PANEL. Ecosystems and human well-being: synthesis; a report of the Millennium Ecosystem Assessment. Washington, DC: Island Press, 2005.
- MINISTERIO DE AMBIENTE, VIVIENDA Y DESARROLLO TERRITORIAL. Política Nacional para la Gestión Integral del Recurso Hídrico de Colombia. , 2010. MINISTERIO DE AMBIENTE Y DESARROLLO SOSTENIBLE. Gobernanza del Agua. , 2016. Disponible en: <<https://archivo.minambiente.gov.co/index.php/gestion-integral-del-recurso-hidrico/gobernanza-del-agua>>
- MINISTERIO DE AMBIENTE Y DESARROLLO SOSTENIBLE. Plan de acción ambiental: cumplimiento de la orden quinta de la Sentencia T-622 de 2016. , 2019. Disponible en: <https://atrato.minambiente.gov.co/wp-content/uploads/2022/02/Plan-de-Accion-Orden-Quinta-cuenca-rio-atrato_opt.pdf> MINISTERIO DE MINAS Y ENERGÍA. Glosario Técnico Minero. , 2003.
- MINISTERIO DE MINAS Y ENERGÍA. 1666. Decreto 1666 de 2016 “Por el cual se adiciona el Decreto Único Reglamentario del Sector Administrativo de Minas y Energía, 1073 de 2015, relacionado con la clasificación minera”. 2016.

- MIRANDA, LORENA S. et al. Water-sediment interactions and mobility of heavy metals in aquatic environments. *Water Research*, v. 202, p. 117386, set. 2021.
- MIRAUDA, DOMENICA ET AL. Assessing the fluvial system resilience of the river Bacchiglione to point sources of pollution in Northeast Italy: a novel Water Resilience Index (WRI) approach. *Environmental science and pollution research international*, v. 28, n. 27, p. 36775–36792, 2021a.
- MIRAUDA, DOMENICA ET AL. Assessing the fluvial system resilience of the river Bacchiglione to point sources of pollution in Northeast Italy: a novel Water Resilience Index (WRI) approach. *Environmental Science and Pollution Research*, v. 28, n. 27, p. 36775–36792, jul. 2021b.
- MITCHELL, JAMES K.; DEVINE, Neal; JAGGER, Kathleen. A Contextual Model of Natural Hazard. *Geographical Review*, v. 79, n. 4, p. 391, out. 1989.
- MONDAL, PRIYANKA ET AL. Geochemical fractionation and risk assessment of trace elements in sediments from tide-dominated Hooghly (Ganges) River Estuary, India. *Chemical Geology*, v. 532, p. 119373, jan. 2020.
- MONFERRAN, MAGDALENA V. et al. Potential human health risks from metals and As via *Odontesthes bonariensis* consumption and ecological risk assessments in a eutrophic lake. *Ecotoxicology and Environmental Safety*, v. 129, p. 302–310, jul. 2016.
- MORALES CALUÑA, Edgar; ALTAMIRANO CAPELO, Fernando. Utilización de Zotero como gestor bibliográfico web en estudiantes universitarios. v. 10, p. 8, 2019. MOTA DE SOUSA, Luís Manuel et al. Revisões da literatura científica: tipos, métodos e aplicações em enfermagem. *Revista Portuguesa de Enfermagem de Reabilitação*, v. 1, n. 1, p. 45–55, 23 jun. 2018.
- MOUNT, NICK. Impactos geomorfológicos de la minería aluvial en el río Quito: implicaciones para la restauración. , 2020.
- MULLER, GMMGMGMGP. Index of geoaccumulation in sediments of the Rhine River. 1969.
- MURHEKAR, GOPALKRUSHNA. Determination of Physico-Chemical parameters of Surface Water Samples in and around Akot City. v. 1, 1 jan. 2011.
- MÜLLER-GRABHERR, DIETMAR ET AL. Integrated river basin management and risk governance. *Risk-informed management of European river basins*, p. 241–264, 2014.
- NAZLABADI, EBRAHIM ET AL. A novel MICMAC approach for cross impact analysis with application to urban water/wastewater management. *Expert Systems with Applications*, v. 230, p. 120667, nov. 2023.
- NEGRETE, JOSÉ LUIS MARRUGO ET AL. ATRATO Y SALUD: RESULTADOS DEL PROYECTO 849 DE AÑO 2018. 2022.
- NGO, HUONG THI THUY ET AL. Metal Pollution and Bioaccumulation in the Nhue-Day River Basin, Vietnam: Potential Ecological and Human Health Risks. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, v. 18, n. 24, p. 13425, 20 dez. 2021.

- NGUYEN, KIEN THANH ET AL. Chemical and microbiological risk assessment of urban river water quality in Vietnam. *Environmental Geochemistry and Health*, v. 41, n. 6, p. 2559–2575, dez. 2019.
- NIGHTINGALE, ALISON. A guide to systematic literature reviews. *Surgery (Oxford)*, v. 27, n. 9, p. 381–384, set. 2009.
- NRIAGU, J. et al. Arsenic in soil and groundwater: an overview. In: *Trace Metals in the Environment*. [S.l.]: Elsevier, 2007. v. 9 p. 3–60. OCDE. Debida diligencia en la cadena de suministros de oro colombiana. El sector minero aurífero en Chocó. , 2017
- OFFICE OF THE UNITED NATION DISASTER RELIEF COORDINATOR. Natural Disaster and Vulnerability Analysis. , 1980. Disponible en: <<https://www.ilankelman.org/miscellany/UNDRO1980.pdf>>
- OFICINA DE LAS NACIONES UNIDAS CONTRA LA DROGA Y EL DELITO. Colombia explotación de oro de aluvión: evidencias a partir de la percepción remota. , 2016. Disponible en: <https://www.unodc.org/documents/colombia/2016/junio/Explotacion_de_Oro_de_Aluvion.pdf>
- OFICINA NACIONAL DE ADMINISTRACIÓN OCEÁNICA Y ATMOSFÉRICA (NOAA). Tablas de referencia rápida para la detección (SQuiRTs). , 2008. Disponible en: <<https://repository.library.noaa.gov/view/noaa/9327>>
- OJEKUNLE, OLUSHEYI Z. et al. Evaluation of surface water quality indices and ecological risk assessment for heavy metals in scrap yard neighbourhood. *SpringerPlus*, v. 5, n. 1, p. 560, dez. 2016.
- OKOLO, C. C.; OYEDOTUN, T. D. T.; AKAMIGBO, F. O. R. Open cast mining: threat to water quality in rural community of Enyigba in south-eastern Nigeria. *Applied Water Science*, v. 8, n. 7, p. 204, nov. 2018.
- OLIVEIRA, HELENA. Chromium as an Environmental Pollutant: Insights on Induced Plant Toxicity. *Journal of Botany*, v. 2012, p. 1–8, 20 maio 2012.
- ORDÓÑEZ, GONZALO A. Salud ambiental: conceptos y actividades. *Revista Panamericana de Salud Pública*, v. 7, n. 3, p. 137–147, mar. 2000.
- ORGANIZACIÓN DE LAS NACIONES UNIDAS PARA LA ALIMENTACIÓN Y LA AGRICULTURA (FAO). Análisis Departamental de Vulnerabilidad y Riesgo frente al Cambio Climático para el sector Agropecuario. , 2022. Disponible en: <https://cambioclimatico.fao.org.co/wp-content/uploads/2023/06/12-CHOCO_21.02.2023.pdf>
- OTÁLVARO-MARÍN, BAIRON; PARRA-LÓPEZ, MARÍA YULITZA; KLINGER-CUNDUMÍ, ESTEFANÍA. Análisis de las injusticias sociales, ambientales y territoriales del departamento del Chocó, Colombia. *PROSPECTIVA. Revista de Trabajo Social e Intervención Social*, p. e20212476, 5 maio 2023.
- OUTA, JAMES OMONDI ET AL. Trace Elements in Crustaceans, Mollusks and Fish in the Kenyan Part of Lake Victoria: Bioaccumulation, Bioindication and Health Risk Analysis.

- Archives of Environmental Contamination and Toxicology, v. 78, n. 4, p. 589–603, maio 2020.
- OZOKO, DANIEL CHUKWUEMEKA; ONYEKWELU, IFEOMA LINDA; AGHAMELU, OKECHUKWU PIUS. Multivariate and health risks analysis of heavy metals in natural water sources around Enugu dumpsite, southeastern Nigeria. *Applied Water Science*, v. 12, n. 9, p. 224, set. 2022.
- PALACIOS, CESAR EMILIO CÓRDOBA. Cambios socioeconómicos y ambientales derivados de la actividad minera informal en la parte media del Río Quito, departamento del Chocó. Tesis de maestría—[S.l.]: Universidad de Manizales, 2022.
- PALACIOS-TORRES, YUBER; CABALLERO-GALLARDO, KARINA; OLIVERO-VERBEL, JESUS. Mercury pollution by gold mining in a global biodiversity hotspot, the Choco biogeographic region, Colombia. *Chemosphere*, v. 193, p. 421–430, fev. 2018.
- PALACIOS-TORRES, YUBER; DE LA ROSA, JESUS D.; OLIVERO-VERBEL, Jesus. Trace elements in sediments and fish from Atrato River: an ecosystem with legal rights impacted by gold mining at the Colombian Pacific. *Environmental Pollution*, v. 256, p. 113290, jan. 2020.
- PALACIOS-VALOYES, EURÍPIDES; SALAS-MORENO, MANUEL H.; MARRUGO-NEGRETE, José L. Biomonitoring of Mercury and Lead Levels in the Blood of Children Living near a Tropical River Impacted by Artisanal and Small-Scale Gold Mining in Colombia. *Toxics*, v. 12, n. 10, p. 744, 13 out. 2024.
- PALANQUES, ALBERT ET AL. Effects of flushing flows on the transport of mercury-polluted particulate matter from the Flix Reservoir to the Ebro Estuary. *Journal of Environmental Management*, v. 260, p. 110028, abr. 2020.
- PALANQUES, ALBERT ET AL. Massive accumulation of highly polluted sedimentary deposits by river damming. *Science of The Total Environment*, v. 497–498, p. 369–381, nov. 2014.
- PARRY, MARTIN L. Climate change 2007-impacts, adaptation and vulnerability: Working group II contribution to the fourth assessment report of the IPCC. [S.l.]: Cambridge University Press, 2007. v. 4
- PARVEZ, MD. Shohel et al. Evaluation of Heavy Metal Contamination in Soil Samples around Rampal, Bangladesh. *ACS Omega*, v. 8, n. 18, p. 15990–15999, 9 maio 2023.
- PENA, JULIO C.; NÁPOLES, Gonzalo; SALGUEIRO, Yamisleydi. Normalization method for quantitative and qualitative attributes in multiple attribute decision-making problems. *Expert Systems with Applications*, v. 198, p. 116821, jul. 2022.
- PIASEK, MARTINA ET AL. Effects of Maternal Cigarette Smoking on Trace Element Levels and Steroidogenesis in the Maternal–Placental–Fetal Unit. *Toxics*, v. 11, n. 8, p. 714, 19 ago. 2023.
- POLSKY, COLIN; NEFF, ROB; YARNAL, BRENT. Building comparable global change vulnerability assessments: The vulnerability scoping diagram. *Global Environmental Change*, v. 17, n. 3–4, p. 472–485, ago. 2007.

- POVEDA-M, INGRID CAROLINA ET AL. El Chocó Biogeográfico: Ambiente físico. 2004.
- PRASAD AHIRVAR, Bhairo et al. Perspectives of heavy metal pollution indices for soil, sediment, and water pollution evaluation: An insight. *Total Environment Research Themes*, v. 6, p. 100039, jun. 2023.
- PRASAD, MUKESH ET AL. A systematic study on occurrence, risk estimation and health implications of heavy metals in potable water from different sources of Garhwal Himalaya, India. *Scientific Reports*, v. 12, n. 1, p. 20419, 28 nov. 2022.
- PRIOR, KIRSTEN M. et al. When does invasive species removal lead to ecological recovery? Implications for management success. *Biological Invasions*, 24 mar. 2022.
- QINGJIE, G. et al. Calculating Pollution Indices by Heavy Metals in Ecological Geochemistry Assessment and a Case Study in Parks of Beijing. *Journal of China University of Geosciences*, v. 19, n. 3, p. 230–241, jun. 2008.
- QU, LIYIN ET AL. Risk analysis of heavy metal concentration in surface waters across the rural-urban interface of the Wen-Rui Tang River, China. *Environmental Pollution*, v. 237, p. 639–649, jun. 2018.
- RADULESCU, CONSTANTA ZOIE; RADULESCU, MARIUS; BONCEA, RADU. A Hybrid Group Weighting Method based on the Borda and the Group Best Worst Method with application for digital development indicators. *Procedia Computer Science*, v. 214, p. 10–17, 2022.
- RAHMAN, ARAFAT; JAHANARA, ISHRAT; JOLLY, YEASMIN NAHAR. Assessment of physicochemical properties of water and their seasonal variation in an urban river in Bangladesh. *Water Science and Engineering*, v. 14, n. 2, p. 139–148, 1 jun. 2021.
- RAKIB, MD. Refat Jahan et al. Assessment of trace element toxicity in surface water of a fish breeding river in Bangladesh: a novel approach for ecological and health risk evaluation. *Toxin Reviews*, v. 41, n. 2, p. 420–436, 3 abr. 2022.
- RAVINDRA, V. et al. Design flow duration curves for environmental flows estimation in Damodar River Basin, India. *Appl Water Sci*, v. 7, p. 1283–1293, 2017.
- RAYNAUD, MARC ET AL. Impact of the COVID-19 pandemic on publication dynamics and non-COVID-19 research production. *BMC Medical Research Methodology*, v. 21, n. 1, p. 255, dez. 2021.
- RESTREPO-VALENCIA, IVAN RODRIGO. Evaluación de la calidad del recurso hídrico del río Cabí a través de la formulación de un índice de contaminación asociado a la actividad minera aurífera. Tesis de maestría—Manizales: Universidad de Manizales, 2015.
- REUSS, MARTIN. *Disasters: The Anatomy of Environmental Hazards*. 1982.
- ROBINSON, STEWART. Conceptual modeling for simulation. In: *WINTER SIMULATION CONFERENCE*. Anais... United Kingdom: 2013.
- ROBLEDO, JILMAR. ¿A dónde se fue la fortuna? Historia económica y social del Chocó, Colombia. [S.l.]: Banco de la República de Colombia, 4 out. 2019. Disponible en:

<https://repositorio.banrep.gov.co/bitstream/handle/20.500.12134/9753/CHE_52.pdf>.
Acceso el: 6 mar. 2024.

- RODRÍGUEZ MIRANDA, Adrián; VIAL COSSANI, Camilo; ALEJANDRA PARRAO, Alejandra. Composite and Multidimensional Index of Regional Development: A proposal for Latin America. *Revista Iberoamericana de Estudios Municipales*, p. 1–34, 27 jan. 2021.
- ROGELIS RINCON, Rodrigo et al. El Atrato es la vida. Conflicto armado y economías extractivas en el río Atrato. , 2022. Disponible en: <https://www.centrosiembra.org/wp-content/uploads/2022/11/Siembra_Atrato_informe-digital-07.pdf>
- RONCANCIO, D. J.; CUTTER, S. L.; NARDOCCI, A. C. Social vulnerability in Colombia. *International Journal of Disaster Risk Reduction*, v. 50, p. 101872, nov. 2020.
- ROSENFELD, JORDAN ET AL. Stressor-response functions as a generalizable model for context dependence. *Trends in Ecology & Evolution*, v. 37, n. 12, p. 1032–1035, dez. 2022.
- ROSSO PINTO, Mauricio José; HANAI, Frederico Yuri. Abordagens sobre nascentes de cursos de água na literatura: uma revisão bibliográfica sistemática. *Desenvolvimento e Meio Ambiente*, v. 62, 7 out. 2023.
- ROSSO-PINTO, MAURICIO; VERGARA-FLÓREZ, VICENTE; MARRUGO-NEGRETE, JOSÉ L. Organochlorine and organophosphate pesticides in soils of a vulnerable area from an aquifer in Northern Colombia. *Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental*, v. 27, n. 8, p. 610–617, ago. 2023.
- RUIZ, HUGO NELSON CASTAÑEDA ET AL. La declaratoria del Río Atrato como entidad sujeto de derechos: una oportunidad para la construcción de un proyecto presente-futuro de territorio sustentable. 2019.
- SABOGAL, ADRIANA. Levantamiento de una línea de base sobre minería ilegal de oro en Colombia., 2012.
- SADEGHI, MAHDI; NOROOZI, MINA. Carcinogenic and Non-Carcinogenic Risk Assessment of Heavy Metals in Water Resources of North East of Iran in 2018. *Journal of Environmental Health and Sustainable Development*, 27 jun. 2021.
- SAHA, NAROTTAM ET AL. Industrial metal pollution in water and probabilistic assessment of human health risk. *Journal of Environmental Management*, v. 185, p. 70–78, jan. 2017.
- SALAZAR-CAMACHO, CARLOS ET AL. A human health risk assessment of methylmercury, arsenic and metals in a tropical river basin impacted by gold mining in the Colombian Pacific region. *Environmental Research*, v. 212, p. 113120, set. 2022.
- SALAZAR-CAMACHO, CARLOS ET AL. Dataset of concentrations of mercury and methylmercury in fish from a tropical river impacted by gold mining in the Colombian Pacific. *Data in Brief*, v. 33, p. 106513, dez. 2020a.
- SALAZAR-CAMACHO, CARLOS ET AL. Mercury species in fish from a tropical river highly impacted by gold mining at the Colombian Pacific region. *Chemosphere*, v. 264, p. 128478, 2021a.

- SALEH, ALI H. et al. Environmental Pollution Indices and Multivariate Modeling Approaches for Assessing the Potentially Harmful Elements in Bottom Sediments of Qaroun Lake, Egypt. *Journal of Marine Science and Engineering*, v. 9, n. 12, p. 1443, 16 dez. 2021.
- SAMPAIO, ROSANA; MANCINI, MC. SYSTEMATIC REVIEW STUDIES: A GUIDE FOR CAREFUL SYNTHESIS OF SCIENTIFIC EVIDENCE. *Rev. bras. fisioter.*, v. 11, n. 1, 2007.
- SARKER, MD NAZIRUL ISLAM ET AL. Assessment of flood vulnerability of riverine island community using a composite flood vulnerability index. *International Journal of Disaster Risk Reduction*, v. 82, p. 103306, nov. 2022.
- SCHÄFER, SABINE ET AL. Bioaccumulation in aquatic systems: methodological approaches, monitoring and assessment. *Environmental Sciences Europe*, v. 27, n. 1, p. 5, dez. 2015.
- SHARAFI, SAEED; SALEHI, FATEMEH. Comprehensive assessment of heavy metal (HMs) contamination and associated health risks in agricultural soils and groundwater proximal to industrial sites. *Scientific Reports*, v. 15, n. 1, p. 7518, 4 mar. 2025.
- SHOJAEZADEH, SHAHAB ALDIN ET AL. Probabilistic hazard assessment of contaminated sediment in rivers. *Science of The Total Environment*, v. 703, p. 134875, fev. 2020.
- SIDDIQUA, AYESHA ET AL. Evaluation of Water Quality and Its Potential Threats Along River Chenab Using Geo Statistical Techniques. *Polish Journal of Environmental Studies*, v. 30, n. 6, p. 5239–5254, 1 out. 2021.
- SILVA, M. G. G. et al. Analysis of water quality at hydrographic basin scale using satellite images, co-occurrence matrices and Bayes classifier. *Water Supply*, v. 21, n. 8, p. 4418–4428, 1 dez. 2021.
- SINGH, UMESH KUMAR; KUMAR, BALWANT. Pathways of heavy metals contamination and associated human health risk in Ajay River basin, India. *Chemosphere*, v. 174, p. 183–199, maio 2017.
- SIQUEIRA, GILMAR W.; APRILE, Fabio. Avaliação de risco ambiental por contaminação metálica e material orgânico em sedimentos da bacia do Rio Aurá, Região Metropolitana de Belém - PA. *Acta Amazonica*, v. 43, n. 1, p. 51–61, mar. 2013.
- SLEEMAN, J. M. et al. Integration of wildlife and environmental health into a One Health approach. *Revue Scientifique et Technique de l'OIE*, v. 38, n. 1, p. 91–102, 1 maio 2019.
- SMITH, KEITH. *Environmental Hazards: Assessing Risk and Reducing Disaster*. 2003.
- SNYDER, HANNAH. Literature review as a research methodology: An overview and guidelines. *Journal of Business Research*, v. 104, p. 333–339, nov. 2019.
- SONG, JIANGMIN; LIU, QUNQUN; SHENG, YANQING. Distribution and risk assessment of trace metals in riverine surface sediments in gold mining area. *Environmental Monitoring and Assessment*, v. 191, n. 3, p. 191, mar. 2019.

- SOUTHERN FEDERAL UNIVERSITY, ROSTOV-ON-DON, RUSSIA et al. Assessment of the heavy metal pollution level of the river sediments in the east Donbass (Rostov region, Russia). *Water and Ecology*, v. 25, n. 3, p. 32–40, 2020.
- SPANIDIS, PHILIP-MARK; ROUMPOS, CHRISTOS; PAVLOUDAKIS, FRANCIS. A Fuzzy-AHP Methodology for Planning the Risk Management of Natural Hazards in Surface Mining Projects. *Sustainability*, v. 13, n. 4, p. 2369, 22 fev. 2021.
- SU, XIAOMEI ET AL. Spatial–Temporal Variations, Ecological Risk Assessment, and Source Identification of Heavy Metals in the Sediments of a Shallow Eutrophic Lake, China. *Toxics*, v. 10, n. 1, p. 16, 4 jan. 2022.
- SÁNCHEZ-CASTELLÓN, JUAN ET AL. Removal of Mercury, Cadmium, and Lead Ions by *Penicillium* sp. *Frontiers in Environmental Chemistry*, v. 2, p. 795632, 24 jan. 2022.
- TABLA-HERNANDEZ, J. et al. Assessment of Potential Toxic Metals in a Ramsar Wetland, Central Mexico and its Self-Depuration through *Eichhornia crassipes*. *Water*, v. 11, n. 6, p. 1248, 14 jun. 2019.
- TAMALE, ANDREW ET AL. Sociocultural factors associated with fish consumption in Lake Albert fishing community: Guidelines for lead and mercury. *Cogent Environmental Science*, v. 3, n. 1, p. 1304604, 1 jan. 2017.
- TAMIM, UMMA ET AL. Elemental distribution of metals in urban river sediments near an industrial effluent source. *Chemosphere*, v. 155, p. 509–518, jul. 2016.
- TANG, WENZHONG ET AL. Heavy Metal Pollution Characteristics of Surface Sediments in Different Aquatic Ecosystems in Eastern China: A Comprehensive Understanding. *PLoS ONE*, v. 9, n. 9, p. e108996, 30 set. 2014.
- TARIQ, MUHAMMAD ET AL. Physicochemical and Bacteriological Characterization of Industrial Wastewater Being Discharged to Surface Water Bodies: Significant Threat to Environmental Pollution and Human Health. *Journal of Chemistry*, v. 2020, p. 1–10, 23 maio 2020.
- TAWABINI, BASSAM ET AL. Spatiotemporal Variability Assessment of Trace Metals Based on Subsurface Water Quality Impact Integrated with Artificial Intelligence-Based Modeling. *Sustainability*, v. 14, n. 4, p. 2192, 15 fev. 2022.
- TEAGUE, A. et al. A collaborative serious game for water resources planning and hazard mitigation. *International Journal of Disaster Risk Reduction*, v. 53, p. 101977, fev. 2021.
- TERRA CEREZINI, Monise et al. Integrated Water Resource Management (IWRM): assessment and applicability of tools in the Brazilian context. *Agua y Territorio / Water and Landscape*, n. 26, p. 237–255, 10 abr. 2025.
- THALHEIM, BERNHARD. The Theory of Conceptual Models, the Theory of Conceptual Modelling and Foundations of Conceptual Modelling. In: EMBLEY, David W.; THALHEIM, Bernhard (Orgs.). *Handbook of Conceptual Modeling*. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, 2011. p. 543–577.

- THARME, R. A GLOBAL PERSPECTIVE ON ENVIRONMENTAL FLOW ASSESSMENT: Emerging trends in the development and application of environmental flow methodologies for rivers. *river research and applications*, v. 19, p. 397–441, 2002.
- TÜMEN AKYILDIZ, Seçil; AHMED, Kwestan Hussein. An Overview of Qualitative Research and Focus Group Discussion. *International Journal of Academic Research in Education*, v. 7, n. 1, p. 1–15, 30 dez. 2021.
- TURNER, B. L. et al. A framework for vulnerability analysis in sustainability science. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, v. 100, n. 14, p. 8074–8079, 8 jul. 2003.
- UGOCHUKWU, UZOCHUKWU CORNELIUS ET AL. Sediments and Water Column Contamination by Heavy Metals in Ekulu River, Nigeria: Ecological and Human Health Risk Assessment. *Asian journal of chemistry*, v. 31, n. 3, p. 699–706, 2019a.
- UGOCHUKWU, UZOCHUKWU CORNELIUS ET AL. Sediments and Water Column Contamination by Heavy Metals in Ekulu River, Nigeria: Ecological and Human Health Risk Assessment. *Asian Journal of Chemistry*, v. 31, n. 3, p. 699–706, 2019b.
- UNIDAD NACIONAL PARA LA GESTIÓN DEL RIESGO DE DESASTRES. Plan Nacional de Gestión del Riesgo de Desastres: una estrategia de desarrollo 2015 - 2025. , 2016. Disponible en: <https://repositorio.gestiondelriesgo.gov.co:8443/bitstream/handle/20.500.11762/756/PN-GRD-2016.pdf>
- UTETE, BEAVEN; FREGENE, BERNADETTE. T. Assessing the spatial and temporal variability and related environmental risks of toxic metals in Lake Asejire, south-western Nigeria. *Scientific African*, v. 7, p. e00259, mar. 2020.
- UTOMO, SUYUD WARNO ET AL. Metal Contents of Lake Fish in Area Close to Disposal of Industrial Waste. *Journal of Environmental and Public Health*, v. 2021, p. 1–7, 21 abr. 2021.
- VALENCIO, NORMA; VALENCIO, ARTHUR. Vulnerability as social oppression: the traps of risk-prevention actions. In: *Reduction of vulnerability to disasters: from knowledge to action*. 1. ed. São Carlos, SP: RiMa Editora, 2017. p. 624.
- WAN, LI; XU, LIANG; FU, YONGSHENG. Contamination and Risk Assessment of Heavy Metals in Lake Bed Sediment of a Large Lake Scenic Area in China. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, v. 13, n. 7, p. 741, 21 jul. 2016.
- WANG, LINGQING; WANG, XUEPING. A holistic assessment of spatio-temporal pattern and water quality in the typical basin of northeast China using multivariate statistical methods. *Process Safety and Environmental Protection*, v. 168, p. 1009–1018, dez. 2022.
- WANG, MENG; CHEN, HUICHAO; LEI, MEI. Identifying potentially contaminated areas with MaxEnt model for petrochemical industry in China. *Environmental Science and Pollution Research*, v. 29, n. 36, p. 54421–54431, ago. 2022.
- WANG, YING ET AL. Water Quality Criteria and Ecological Risk Assessment of Typical Transition Metals in South Asia. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, v. 19, n. 23, p. 16125, 2 dez. 2022a.

- WANG, YU ET AL. Health Risk Assessment Based on Source Identification of Heavy Metal(loid)s: A Case Study of Surface Water in the Lijiang River, China. *Toxics*, v. 10, n. 12, p. 726, 25 nov. 2022b.
- WESCHE, PHILIPP. Rights of Nature in Practice: A Case Study on the Impacts of the Colombian Atrato River Decision. *Journal of Environmental Law*, v. 33, n. 3, p. 531–555, 17 nov. 2021.
- WISNER, BEN ET AL. *At Risk: natural hazards, people's vulnerability and disasters*. 1. ed. [S.l.: S.n.].
- WORLANYO, ADATOR STEPHANIE; JIANGFENG, LI. Evaluating the environmental and economic impact of mining for post-mined land restoration and land-use: A review. *Journal of Environmental Management*, v. 279, p. 111623, fev. 2021.
- WORLD HEALTH ORGANIZATION. *Recycling used lead-acid batteries: health considerations*. Geneva: World Health Organization, 2017a.
- WORLD HEALTH ORGANIZATION. *Guidelines for Drinking-Water Quality: Fourth Edition Incorporating the First Addendum*. Geneva: World Health Organization, 2017b.
- WORLD RESOURCES INSTITUTE. *MINING AND CRITICAL ECOSYSTEMS: Mapping the Risks*. , 2004. Disponible en: <https://essc.org.ph/content/wp-content/uploads/2007/02/mining_critical_ecosystems_full.pdf>
- WU, HONGJING; CHEN, BING. Using Statistical and Probabilistic Methods to Evaluate Health Risk Assessment: A Case Study. *Toxics*, v. 2, n. 2, p. 291–306, 11 jun. 2014.
- YAN, TAO; SHEN, SHUI-LONG; ZHOU, ANNAN. Indices and models of surface water quality assessment: Review and perspectives. *Environmental Pollution*, v. 308, p. 119611, set. 2022.
- YANG, JIWEI ET AL. Multiple Risk Assessment of Heavy Metals in Surface Water and Sediment in Taihu Lake, China. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, v. 19, n. 20, p. 13120, 12 out. 2022.
- YAQOOB, ZARISH ET AL. Bioaccumulation of Metals in the Organs of Fish inhabiting Ravi River: Serious Threat to Fish and Consumer's Health. *Pakistan Journal of Zoology*, v. 52, n. 6, 2020.
- YI, LING ET AL. Characteristics and Assessment of Toxic Metal Contamination in Surface Water and Sediments Near a Uranium Mining Area. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, v. 17, n. 2, p. 548, 15 jan. 2020.
- YU, LI ET AL. Evaluation of Heavy Metal Pollutants From Plateau Mines in Wetland Surface Deposits. *Frontiers in Environmental Science*, v. 8, p. 557302, 29 jan. 2021.
- ZAIDI, JAMSHED. Water quality index (WQI) of three historical lakes in mahoba district of bundelkhand region, Uttar Pradesh, India. 9 out. 2013.
- ZAIT, ROXANA ET AL. Priority Pollutants Effects on Aquatic Ecosystems Evaluated through Ecotoxicity, Impact, and Risk Assessments. *Water*, v. 14, n. 20, p. 3237, 14 out. 2022.

- ZAPATA, GILBERTO. Geología de la Plancha 184 Lloró. Servicio Geológico Colombiano, , 2002. Disponible en: <<https://catalogo.sgc.gov.co/cgi-bin/koha/opac-detail.pl>
- ZAYED, ADEL M.; TERRY, Norman. Chromium in the environment: factors affecting biological remediation. 2003.
- ZHANG, HUA ET AL. Heavy Metal Concentrations and Risk Assessment of Sediments and Surface Water of the Gan River, China. Polish Journal of Environmental Studies, v. 25, n. 4, p. 1529–1540, 2016.
- ZHANG, LONG ET AL. Effects of Agriculture and Animal Husbandry on Heavy Metal Contamination in the Aquatic Environment and Human Health in Huangshui River Basin. Water, v. 14, n. 4, p. 549, 12 fev. 2022.
- ZHANG, QIN; ZHAO, XUEYAN; TANG, HAIPING. Vulnerability of communities to climate change: application of the livelihood vulnerability index to an environmentally sensitive region of China. Climate and Development, v. 11, n. 6, p. 525–542, 3 jul. 2019.
- ZHANG, XIAOLING ET AL. A Risk Explicit Interval Linear Programming Model for Uncertainty-Based Environmental Economic Optimization in the Lake Fuxian Watershed, China. The Scientific World Journal, v. 2013, n. 1, p. 824078, jan. 2013.
- ZHAO, DI; WANG, PENG; ZHAO, FANG-JIE. Dietary cadmium exposure, risks to human health and mitigation strategies. 2022.
- ZINABU, E. et al. Monitoring river water and sediments within a changing Ethiopian catchment to support sustainable development. Environmental Monitoring and Assessment, v. 191, n. 7, p. 455, jul. 2019.

Apéndice A. Listado de artículos seleccionados a partir de la Revisión Bibliográfica Sistemática

Referencia	Título	Código	Año
(Bilal et al., 2022)	Cadmium (Cd) influences calcium (Ca) levels in the skeleton of a freshwater fish <i>Channa gachua</i>	AA01	2022
(Mao et al., 2022a)	Spatial Distribution and Ecological Risk Assessment of Heavy Metals in the Sediment of a Tropical Mangrove Wetland on Hainan Island, China	AA07	2022
(González-Morales; Fernández-Pozo; Rodríguez-González, 2022b)	Threats of metal mining on ecosystem services. Conservation proposals	AA11	2022
(Jiang et al., 2022)	Spatiotemporal variation and ecological risk assessment of sediment heavy metals in two hydrologically connected lakes	AA14	2022
(Ozoko; Onyekwelu; Aghamelu, 2022)	Multivariate and health risks analysis of heavy metals in natural water sources around Enugu dumpsite, southeastern Nigeria	AA18	2022
(Goyal et al., 2022)	Appraisal of heavy metal pollution in the water resources of Western Uttar Pradesh, India and associated risks	AA26	2022
(Tawabini et al., 2022)	Spatiotemporal Variability Assessment of Trace Metals Based on Subsurface Water Quality Impact Integrated with Artificial Intelligence-Based Modeling	AA32	2022
(Siddiqua et al., 2021)	Evaluation of Water Quality and Its Potential Threats Along River Drini Bardh Using Analytical Instrumental Techniques	AA36	2022

Referencia	Título	Código	Año
(Kang et al., 2021)	Spatial distribution characteristics and health risk assessment of heavy metals in surface sediment of the Hai River and its tributaries in Tianjin, China	AA45	2021
(Addo-Bediako; Nukeri; Kekana, 2021)	Heavy metal and metalloid contamination in the sediments of the Spekboom River, South Africa	AA50	2021
(Hossain et al., 2021)	Comparative seasonal assessment of pollution and health risks associated with heavy metals in water, sediment and Fish of Buriganga and Turag River in Dhaka City, Bangladesh	AA56	2021
(Korça; Demaku, 2022)	Evaluation of water quality and its potential threats along river chenab using geo statistical techniques	AA61	2021
(El-Amier et al., 2020)	Ecological risk assessment of heavy metals along three main drains in Nile delta and potential phytoremediation by macrophyte plants	AA72	2020
(Yaqoob et al., 2020)	Bioaccumulation of metals in the organs of fish inhabiting Ravi River: Serious threat to fish and consumers health	AA82	2020
(Tariq et al., 2020)	Physicochemical and Bacteriological Characterization of Industrial Wastewater Being Discharged to Surface Water Bodies: Significant Threat to Environmental Pollution and Human Health	AA84	2020
(Hu et al., 2018)	Flood-induced metal contamination in the topsoil of floodplain agricultural soils: a case study in Colombia	AA88	2019
(Tabla-Hernandez et al., 2019)	Assessment of potential toxic metals in a Ramsar wetland, Central Mexico and its self-depuration through <i>Eichhornia crassipes</i>	AA94	2019
(Huang et al., 2019)	Distribution, Source and Risk Assessment of Heavy Metal(oid)s in Water, Sediments, and <i>Corbicula fluminea</i> of Xijiang River, China	AA97	2019
(Ugochukwu et al., 2019b)	Sediments and water column contamination by heavy metals in Ekulu River, Nigeria: Ecological and human health risk assessment	AA105	2019
(Okolo; Oyedotun; Akamigbo, 2018)	Open cast mining: threat to water quality in rural community of Enyigba in south-eastern Nigeria	AA107	2018
(Hudson et al., 2018b)	Integrated Hydrological and Geophysical Characterisation of Surface and Subsurface Water Contamination at Abandoned Metal Mines	AA110	2018
(Consani et al., 2017)	Metal transport and remobilisation in a basin affected by acid mine drainage: the role of ochreous amorphous precipitates	AA118	2017
(Saha et al., 2017)	Industrial metal pollution in water and probabilistic assessment of human health risk	AA123	2017
(Ojekunle et al., 2016)	Evaluation of surface water quality indices and ecological risk assessment for heavy metals in scrap yard neighbourhood	AA124	2016
(Arefin et al., 2016)	Heavy metal contamination in surface water used for irrigation: Functional assessment of the Turag river in Bangladesh	AA128	2016
(Chen et al., 2015)	Industrial arsenic contamination causes catastrophic changes in freshwater ecosystems	AA136	2015
(Lu et al., 2015)	Impacts of soil and water pollution on food safety and health risks in China	AA138	2015
(Tang et al., 2014)	Heavy metal pollution characteristics of surface sediments in different aquatic ecosystems in Eastern China: a comprehensive understanding	AA143	2014
(Ayantobo, 2014)	Gold mining in Igou Ijesha, southwest Nigeria: Impacts and implications for water quality	AA145	2014
(Angelovičová; Fazekášová, 2014)	Contamination of the soil and water environment by heavy metals in the former mining area of Rudňany (Slovakia)	AA148	2014

Referencia	Título	Código	Año
(Hasan et al., 2023)	Distribution of Cr, Cd, Cu, Pb and Zn in organs of three selected local fish species of Turag River, Bangladesh and impact assessment on human health	AB01	2023
(Prasad et al., 2022)	A systematic study on occurrence, risk estimation and health implications of heavy metals in potable water from different sources of Garhwal Himalaya, India	AB02	2022
(Elhaddad et al., 2022)	Risk Assessment and Hazardous Effects of Metal Contamination in <i>O. niloticus</i> and <i>S. galilaeus</i> from Four Islands of the River Nile	AB07	2022
(Yang et al., 2022)	Multiple Risk Assessment of Heavy Metals in Surface Water and Sediment in Taihu Lake, China	AB09	2022
(Jaiswal et al., 2022)	Heavy metal contamination in the complete stretch of Yamuna River: a fuzzy logic approach for comprehensive health risk assessment	AB11	2022
(El-Saadani et al., 2022)	Environmental Geochemistry and Fractionation of Cadmium Metal in Surficial Bottom Sediments and Water of the Nile River, Egypt	AB15	2022
(Zhang et al., 2022)	Effects of Agriculture and Animal Husbandry on Heavy Metal Contamination in the Aquatic Environment and Human Health in Huangshui River Basin	AB25	2022
(Su et al., 2022)	Spatial–Temporal Variations, Ecological Risk Assessment, and Source Identification of Heavy Metals in the Sediments of a Shallow Eutrophic Lake, China	AB30	2022
(Rakib et al., 2022)	Assessment of trace element toxicity in surface water of a fish breeding river in Bangladesh: a novel approach for ecological and health risk evaluation	AB32	2022
(Ngo et al., 2021)	Metal pollution and bioaccumulation in the Nhue-Day river basin, Vietnam: Potential ecological and human health risks	AB33	2021
(Afolayan et al., 2021)	Physicochemical studies for risk identification, assessment, and characterization of artisanal barite mining in Nigeria	AB35	2021
(Haghnazar et al., 2021)	Potentially toxic elements contamination in surface sediment and indigenous aquatic macrophytes of the Bahmanshir River, Iran: Appraisal of phytoremediation capability	AB37	2021
(Chan et al., 2021)	Metal accumulations in aquatic organisms and health risks in an acid mine-affected site in South China	AB42	2021
(Yu et al., 2021)	Evaluation of Heavy Metal Pollutants from Plateau Mines in Wetland Surface Deposits	AB59	2021
(Sadeghi; Noroozi, 2021)	Carcinogenic and Non-carcinogenic Risk Assessment of Heavy Metals in Water Resources of Northeast of Iran in 2018	AB66	2021
(Effah et al., 2021)	Human health risk assessment from heavy metals in three dominant fish species of the Ankobra river, Ghana	AB67	2021
(Utomo et al., 2021)	Metal Contents of Lake Fish in Area Close to Disposal of Industrial Waste	AB68	2021
(Astuti et al., 2021)	Risk identification of heavy metals in well water surrounds watershed area of Pangkajene, Indonesia	AB69	2021
(Addo-Bediako; Malakane, 2020)	Preliminary assessment of chemical elements in sediments and larvae of <i>Gomphidae</i> (<i>Odonata</i>) from the Blyde river of the olifants river system, South Africa	AB76	2020
(Hidayati et al., 2020)	Assessment of the ecological and human health risks from metals in shrimp aquaculture environments in Central Java, Indonesia	AB77	2020
(Outa et al., 2020)	Trace Elements in Crustaceans, Mollusks and Fish in the Kenyan Part of Lake Victoria: Bioaccumulation, Bioindication and Health Risk Analysis	AB83	2020
(Egbueri; Mgbenu, 2020)	Chemometric analysis for pollution source identification and human health risk assessment of water resources in Ojoto Province, southeast Nigeria	AB85	2020

Referencia	Título	Código	Año
(Utete; Fregene, 2020)	Assessing the spatial and temporal variability and related environmental risks of toxic metals in Lake Asejire, south-western Nigeria	AB90	2020
(Shojaezadeh et al., 2020)	Probabilistic hazard assessment of contaminated sediment in rivers	AB91	2020
(Yi et al., 2020)	Characteristics and assessment of toxic metal contamination in surface water and sediments near a Uranium mining area	AB94	2020
(Southern Federal University, Rostov-on-Don, Russia et al., 2020)	Assessment of the heavy metal pollution level of the river sediments in the east Donbass (Rostov region, Russia)	AB97	2020
(Maftai et al., 2019b)	Spatial distribution of minor elements in the Tazlău river sediments: Source identification and evaluation of ecological risk	AB101	2019
(Nguyen et al., 2019)	Chemical and microbiological risk assessment of urban river water quality in Vietnam	AB103	2019
(Song; Liu; Sheng, 2019)	Distribution and risk assessment of trace metals in riverine surface sediments in gold mining area	AB113	2019
(Ezemonye et al., 2019)	Potential health risk consequences of heavy metal concentrations in surface water, shrimp (<i>Macrobrachium macrobrachion</i>) and fish (<i>Brycinus longipinnis</i>) from Benin River, Nigeria	AB121	2019
(Qu et al., 2018)	Risk analysis of heavy metal concentration in surface waters across the rural-urban interface of the Wen-Rui Tang River, China	AB127	2018
(Islam; Ahmed; Habibullah-Al-Mamun, 2017)	Heavy metals in sediment and their accumulation in commonly consumed fish species in Bangladesh	AB137	2017
(Wan; Xu; Fu, 2016)	Contamination and risk assessment of heavy metals in lakebed sediment of a large lake scenic area in China	AB141	2016
(Monferran et al., 2016)	Potential human health risks from metals and As via <i>Odontesthes bonariensis</i> consumption and ecological risk assessments in a eutrophic lake	AB142	2016
(Zhang et al., 2016)	Heavy metal concentrations and risk assessment of sediments and surface water of the Gan River, China	AB146	2016
(Adamu; Nganje; Edet, 2015)	Heavy metal contamination and health risk assessment associated with abandoned barite mines in Cross River State, southeastern Nigeria	AB154	2015
(Imran et al., 2019)	Health risk assessment of the exposure of heavy metal contamination in surface water of lower Sindh, Pakistan	AC05	2019
(Avigliano et al., 2019)	Arsenic, selenium, and metals in a commercial and vulnerable fish from southwestern Atlantic estuaries: distribution in water and tissues and public health risk assessment	AC07	2019
(Siqueira; Aprile, 2013)	Evaluation of environmental risk by metallic contamination and organic compounds in sediments of the Aurá River basin, Belém, Pará-Brazil	AC15	2013
(Wang; Chen; Lei, 2022)	Identifying potentially contaminated areas with MaxEnt model for petrochemical industry in China	AD15	2022
(Salazar-Camacho et al., 2021b)	Mercury species in fish from a tropical river highly impacted by gold mining at the Colombian Pacific region	AG01	2021
(Salazar-Camacho et al., 2022)	A human health risk assessment of methylmercury, arsenic and metals in a tropical river basin impacted by gold mining in the Colombian Pacific region	AH01	2022
(Marrugo-Madrid et al., 2022)	Assessment of dissolved mercury by diffusive gradients in thin films devices in abandoned ponds impacted by small scale gold mining	AH02	2022
(Gallego Ríos et al., 2018b)	Evaluation of Mercury, Lead, Arsenic, and Cadmium in Some Species of Fish in the Atrato River Delta, Gulf of Urabá, Colombian Caribbean	AH04	2018

Referencia	Título	Código	Año
(IORDACHE et al., 2020)	Assessment of heavy metals pollution in sediments from reservoirs of the Olt River as tool for environmental risk management	BA11	2019
(Wu; Chen, 2014)	Using statistical and probabilistic methods to evaluate health risk assessment: a case study	BA14	2014
(Zait et al., 2022)	Priority Pollutants Effects on Aquatic Ecosystems Evaluated through Ecotoxicity, Impact, and Risk Assessments	BB07	2022
(McDonald et al., 2022)	Case Study of Collaborative Modeling in an Indigenous Community	BB08	2022
(Castro, 2022)	Optimizing nature-based solutions by combining social equity, hydro-environmental performance, and economic costs through a novel Gini coefficient	BB10	2022
(Silva et al., 2021)	Analysis of water quality at hydrographic basin scale using satellite images, co-occurrence matrices and Bayes classifier	BB19	2021
(Mirauda et al., 2021b)	Assessing the fluvial system resilience of the river Bacchiglione to point sources of pollution in Northeast Italy: a novel Water Resilience Index (WRI) approach	BB23	2021
(Teague et al., 2021)	A collaborative serious game for water resources planning and hazard mitigation	BB30	2021
(Bertrand et al., 2019)	Usefulness of a freshwater macrophyte (<i>Potamogeton pusillus</i>) for an environmental risk assessment in a multi-source contaminated basin.	BB51	2019
(Zhang et al., 2013)	A risk explicit interval linear programming model for uncertainty-based environmental economic optimization in the lake Fuxian watershed, China	BB98	2013
(Jawad-UI-Haque et al., 2023)	Effects of COVID-19 era on a subtropical river basin in Bangladesh: Heavy metal(loid)s distribution, sources and probable human health risks	BE01	2023
(Wang et al., 2022b)	Health Risk Assessment Based on Source Identification of Heavy Metal(loid)s: A Case Study of Surface Water in the Lijiang River, China	BE03	2022
(Wang et al., 2022a)	Water Quality Criteria and Ecological Risk Assessment of Typical Transition Metals in South Asia	BE04	2022
(Saleh et al., 2021)	Environmental pollution indices and multivariate modeling approaches for assessing the potentially harmful elements in bottom sediments of Qaroun lake, Egypt	BE18	2021
(Han; Zhou; Chen, 2021, p. 1999–2018)	Spatio-temporal distribution of environmental health risk of heavy metals in industrial wastewater of China during 1999–2018	BE22	2021
(Liu et al., 2021)	Quantifying and predicting ecological and human health risks for binary heavy metal pollution accidents at the watershed scale using Bayesian Networks	BE25	2021
(Palanques et al., 2020)	Effects of flushing flows on the transport of mercury-polluted particulate matter from the Flix Reservoir to the Ebro Estuary	BE32	2020
(Enuneku et al., 2018)	Evaluating the potential health risks of heavy metal pollution in sediment and selected benthic fauna of Benin River, Southern Nigeria	BE42	2018
(Tamale et al., 2017)	Sociocultural factors associated with fish consumption in Lake Albert fishing community: Guidelines for lead and mercury	BE49	2017
(Yan; Shen; Zhou, 2022)	Indices and models of surface water quality assessment: Review and perspectives	BF19	2022
(Wang; Wang, 2022)	A holistic assessment of spatio-temporal pattern and water quality in the typical basin of northeast China using multivariate statistical methods	BF20	2022
(Zinabu et al., 2019)	Monitoring river water and sediments within a changing Ethiopian catchment to support sustainable development	BG03	2019

Referencia	Título	Código	Año
(Elhag et al., 2017)	Olive mill waste water risk assessment based on GIS techniques in Crete, Greece	BH82	2017
(Delpla et al., 2014b)	A decision support system for drinking water production integrating health risks assessment	BH100	2014

Apéndice B. Caja de herramientas para el análisis de la amenaza, vulnerabilidad y/o riesgo derivado de la contaminación por metales pesados.

Herramienta 1	
Nombre	Índice de riesgo ecológico individual (E_i)
Tipo	Indicador
Objetivo	Cuantificar el potencial de daño que representan los metales pesados en los sedimentos para el ecosistema. Esto se logra mediante la comparación entre la concentración medida de cada metal y su nivel de referencia, teniendo en cuenta la toxicidad específica de cada elemento.
Referencia bibliográfica	MAO, Changping <i>et al.</i> Spatial Distribution and Ecological Risk Assessment of Heavy Metals in the Sediment of a Tropical Mangrove Wetland on Hainan Island, China. Water, v. 14, n. 22, p. 3785, 21 nov. 2022. SU, Xiaomei <i>et al.</i> Spatial–Temporal Variations, Ecological Risk Assessment, and Source Identification of Heavy Metals in the Sediments of a Shallow Eutrophic Lake, China. Toxics, v. 10, n. 1, p. 16, 4 jan. 2022.
Herramienta 2	
Nombre	Índice de Riesgo Ecológico Potencial (RI)
Tipo	Indicador
Objetivo	evaluar de manera integral el nivel de peligro que representan los metales pesados en los sedimentos para el ecosistema. Suma los riesgos individuales de cada metal, considerando su toxicidad y concentración, para determinar el riesgo total en una zona.
Referencia bibliográfica	HIDAYATI, Nuning Vita <i>et al.</i> Assessment of the ecological and human health risks from metals in shrimp aquaculture environments in Central Java, Indonesia. Environmental Science and Pollution Research, v. 27, n. 33, p. 41668–41687, nov. 2020. MAO, Changping <i>et al.</i> Spatial Distribution and Ecological Risk Assessment of Heavy Metals in the Sediment of a Tropical Mangrove Wetland on Hainan Island, China. Water, v. 14, n. 22, p. 3785, 21 nov. 2022. UGOCHUKWU, Uzochukwu Cornelius <i>et al.</i> Sediments and Water Column Contamination by Heavy Metals in Ekulu River, Nigeria: Ecological and Human Health Risk Assessment. Asian Journal of Chemistry, v. 31, n. 3, p. 699–706, 2019. YANG, Jiwei <i>et al.</i> Multiple Risk Assessment of Heavy Metals in Surface Water and Sediment in Taihu Lake, China. International Journal of Environmental Research and Public Health, v. 19, n. 20, p. 13120, 12 out. 2022 YU, Li <i>et al.</i> Evaluation of Heavy Metal Pollutants From Plateau Mines in Wetland Surface Deposits. Frontiers in Environmental Science, v. 8, p. 557302, 29 jan. 2021.

Herramienta 3	
Nombre	Cociente de concentración de efecto probable medio (mPEC-Q)
Tipo	Indicador
Objetivo	Evaluar la probabilidad de ocurrencia de contaminación tóxica en los sedimentos y determinar el potencial de riesgo ecológico asociado con las concentraciones de metales pesados.
Referencia bibliográfica	BERTRAND, Lidwina <i>et al.</i> Usefulness of a freshwater macrophyte (<i>Potamogeton pusillus</i>) for an environmental risk assessment in a multi-source contaminated basin. Chemosphere, v. 222, p. 1003–1016, maio 2019. MAO, Changping <i>et al.</i> Spatial Distribution and Ecological Risk Assessment of Heavy Metals in the Sediment of a Tropical Mangrove Wetland on Hainan Island, China. Water, v. 14, n. 22, p. 3785, 21 nov. 2022.

Herramienta 4	
Nombre	Índice de geoacumulación (Igeo)
Tipo	Indicador
Objetivo	Determinar el grado de contaminación por metales pesados en un área específica, comparando la concentración de elementos contaminantes con su concentración geológica natural en la corteza terrestre
Referencia bibliográfica	EL-AMIER, Yasser A. <i>et al.</i> Ecological Risk Assessment of Heavy Metals along Three Main Drains in Nile Delta and Potential Phytoremediation by Macrophyte Plants. Plants, v. 9, n. 7, p. 910, 18 jul. 2020. MAO, Changping <i>et al.</i> Spatial Distribution and Ecological Risk Assessment of Heavy Metals in the Sediment of a Tropical Mangrove Wetland on Hainan Island, China. Water, v. 14, n. 22, p. 3785, 21 nov. 2022. GOYAL, V. C. <i>et al.</i> Appraisal of heavy metal pollution in the water resources of Western Uttar Pradesh, India and associated risks. Environmental Advances, v. 8, p. 100230, jul. 2022. MARRUGO-NEGRETE, José <i>et al.</i> Flood-induced metal contamination in the topsoil of floodplain agricultural soils: A case-study in Colombia. Land Degradation & Development, v. 30, n. 17, p. 2139–2149, nov. 2019. TABLA-HERNANDEZ, J. <i>et al.</i> Assessment of Potential Toxic Metals in a Ramsar Wetland, Central Mexico and its Self-Depuration through <i>Eichhornia crassipes</i>. Water, v. 11, n. 6, p. 1248, 14 jun. 2019.

Herramienta 6	
Nombre	Factor de contaminación (CF)
Tipo	Indicador
Objetivo	Cuantificar el nivel de contaminación de un metal pesado en el suelo en relación con un valor de referencia, permitiendo clasificar la contaminación en diferentes niveles de severidad.

Referencia bibliográfica	EL-AMIER, Yasser A. <i>et al.</i> Ecological Risk Assessment of Heavy Metals along Three Main Drains in Nile Delta and Potential Phytoremediation by Macrophyte Plants. Plants , v. 9, n. 7, p. 910, 18 jul. 2020.
	GONZÁLEZ-MORALES, María; FERNÁNDEZ-POZO, Luis; RODRÍGUEZ-GONZÁLEZ, M ^a Ángeles. Threats of metal mining on ecosystem services. Conservation proposals. Environmental Research , v. 214, p. 114036, nov. 2022.
	HOSSAIN, M. N. et al. Comparative seasonal assessment of pollution and health risks associated with heavy metals in water, sediment and Fish of Buriganga and Turag River in Dhaka City, Bangladesh. SN Applied Sciences , v. 3, n. 4, abr. 2021.
	MARRUGO-NEGRETE, José <i>et al.</i> Flood-induced metal contamination in the topsoil of floodplain agricultural soils: A case-study in Colombia. Land Degradation & Development , v. 30, n. 17, p. 2139–2149, nov. 2019.
	UGOCHUKWU, Uzochukwu Cornelius <i>et al.</i> Sediments and Water Column Contamination by Heavy Metals in Ekulu River, Nigeria: Ecological and Human Health Risk Assessment. Asian Journal of Chemistry , v. 31, n. 3, p. 699–706, 2019.

Herramienta 7

Nombre	Grado de contaminación (Dc)
Tipo	Indicador
Objetivo	Proporcionar una medida global del grado de contaminación en un área al sumar los factores de contaminación de múltiples metales, facilitando la identificación de áreas con alta carga contaminante
Referencia bibliográfica	GONZÁLEZ-MORALES, María; FERNÁNDEZ-POZO, Luis; RODRÍGUEZ-GONZÁLEZ, M ^a Ángeles. Threats of metal mining on ecosystem services. Conservation proposals. Environmental Research , v. 214, p. 114036, nov. 2022.
	EL-AMIER, Yasser A. <i>et al.</i> Ecological Risk Assessment of Heavy Metals along Three Main Drains in Nile Delta and Potential Phytoremediation by Macrophyte Plants. Plants , v. 9, n. 7, p. 910, 18 jul. 2020.
	UGOCHUKWU, Uzochukwu Cornelius <i>et al.</i> Sediments and Water Column Contamination by Heavy Metals in Ekulu River, Nigeria: Ecological and Human Health Risk Assessment. Asian Journal of Chemistry , v. 31, n. 3, p. 699–706, 2019.

Herramienta 8

Nombre	Índice de carga de contaminación (PLI)
Tipo	Indicador
Objetivo	Evaluar el nivel global de contaminación del sedimento por metales pesados, combinando los factores de contaminación individuales (CF) de todos los metales analizados. Este índice proporciona una visión

	integrada de la calidad del sedimento en un sitio determinado, permitiendo identificar si el ambiente está limpio o contaminado.
Referencia bibliográfica	GONZÁLEZ-MORALES, María; FERNÁNDEZ-POZO, Luis; RODRÍGUEZ-GONZÁLEZ, M^a Ángeles. Threats of metal mining on ecosystem services. Conservation proposals. Environmental Research, v. 214, p. 114036, nov. 2022 HIDAYATI, Nuning Vita <i>et al.</i> Assessment of the ecological and human health risks from metals in shrimp aquaculture environments in Central Java, Indonesia. Environmental Science and Pollution Research, v. 27, n. 33, p. 41668–41687, nov. 2020. SU, Xiaomei <i>et al.</i> Spatial–Temporal Variations, Ecological Risk Assessment, and Source Identification of Heavy Metals in the Sediments of a Shallow Eutrophic Lake, China. Toxics, v. 10, n. 1, p. 16, 4 jan. 2022. UGOCHUKWU, Uzochukwu Cornelius <i>et al.</i> Sediments and Water Column Contamination by Heavy Metals in Ekulu River, Nigeria: Ecological and Human Health Risk Assessment. Asian Journal of Chemistry, v. 31, n. 3, p. 699–706, 2019. YANG, Jiwei <i>et al.</i> Multiple Risk Assessment of Heavy Metals in Surface Water and Sediment in Taihu Lake, China. International Journal of Environmental Research and Public Health, v. 19, n. 20, p. 13120, 12 out. 2022.

Herramienta 9

Nombre	Índice de evaluación de metales pesados (HEI)
Tipo	Indicador
Objetivo	Determinar la calidad del agua en términos de seguridad, clasificando el agua como segura o crítica según los niveles de concentración de metales pesados.
Referencia bibliográfica	OZOKO, Daniel Chukwumeka; ONYEKWELU, Ifeoma Linda; AGHAMELU, Okechukwu Pius. Multivariate and health risks analysis of heavy metals in natural water sources around Enugu dumpsite, southeastern Nigeria. Applied Water Science, v. 12, n. 9, p. 224, set. 2022. PRASAD, Mukesh <i>et al.</i> A systematic study on occurrence, risk estimation and health implications of heavy metals in potable water from different sources of Garhwal Himalaya, India. Scientific Reports, v. 12, n. 1, p. 20419, 28 nov. 2022.

Herramienta 10

Nombre	Índice de contaminación por metales pesados (HPI)
Tipo	Indicador
Objetivo	Medir el nivel de contaminación, clasificando el agua en baja, media o alta contaminación según los valores de concentración permisibles.

Referencia bibliográfica	ASTUTI, Ratna Dwi Puji <i>et al.</i> Risk identification of heavy metals in well water surrounds watershed area of Pangkajene, Indonesia. Gaceta Sanitaria , v. 35, p. S33–S37, 2021.
	OJEKUNLE, Olusheyi Z. <i>et al.</i> Evaluation of surface water quality indices and ecological risk assessment for heavy metals in scrap yard neighbourhood. SpringerPlus , v. 5, n. 1, p. 560, dez. 2016.
	OZOKO, Daniel Chukwuemeka; ONYEKWELU, Ifeoma Linda; AGHAMELU, Okechukwu Pius. Multivariate and health risks analysis of heavy metals in natural water sources around Enugu dumpsite, southeastern Nigeria. Applied Water Science , v. 12, n. 9, p. 224, set. 2022.
	PRASAD, Mukesh <i>et al.</i> A systematic study on occurrence, risk estimation and health implications of heavy metals in potable water from different sources of Garhwal Himalaya, India. Scientific Reports , v. 12, n. 1, p. 20419, 28 nov. 2022.

Herramienta 11

Nombre	Índice de contaminación (CI)
Tipo	Indicador
Objetivo	Medir el nivel de contaminación, clasificando el agua en baja, media o alta contaminación según los valores de concentración permisibles.
Referencia bibliográfica	OZOKO, Daniel Chukwuemeka; ONYEKWELU, Ifeoma Linda; AGHAMELU, Okechukwu Pius. Multivariate and health risks analysis of heavy metals in natural water sources around Enugu dumpsite, southeastern Nigeria. Applied Water Science , v. 12, n. 9, p. 224, set. 2022.

Herramienta 12

Nombre	Coefficiente de peligro (HQ)
Tipo	Indicador
Objetivo	Determinar si la exposición a un metal específico representa un riesgo para la salud, considerando que un valor de HQ mayor que 1 indica un potencial de riesgo no carcinogénico (Relación entre la dosis de exposición (CDI) y la dosis Referencia (RfD)).
Referencia bibliográfica	GOYAL, V. C. <i>et al.</i> Appraisal of heavy metal pollution in the water resources of Western Uttar Pradesh, India and associated risks. Environmental Advances , v. 8, p. 100230, jul. 2022. OZOKO, Daniel Chukwuemeka; ONYEKWELU, Ifeoma Linda; AGHAMELU, Okechukwu Pius. Multivariate and health risks analysis of heavy metals in natural water sources around Enugu dumpsite, southeastern Nigeria. Applied Water Science , v. 12, n. 9, p. 224, set. 2022. SADEGHI, Mahdi; NOROOZI, Mina. Carcinogenic and Non-Carcinogenic Risk Assessment of Heavy Metals in Water Resources of North East of Iran in 2018. Journal of Environmental Health and Sustainable Development , 27 jun. 2021.

	SIDDIQUA, Ayesha <i>et al.</i> Evaluation of Water Quality and Its Potential Threats Along River Chenab Using Geo Statistical Techniques. Polish Journal of Environmental Studies, v. 30, n. 6, p. 5239–5254, 1 out. 2021. UGOCHUKWU, Uzochukwu Cornelius <i>et al.</i> Sediments and Water Column Contamination by Heavy Metals in Ekulu River, Nigeria: Ecological and Human Health Risk Assessment. Asian Journal of Chemistry, v. 31, n. 3, p. 699–706, 2019.
--	---

Herramienta 13

Nombre	Índice de peligro (HI)
Tipo	Indicador
Objetivo	Evaluar el riesgo para la salud humana asociado con la exposición a metales pesados.
Referencia bibliográfica	GOYAL, V. C. <i>et al.</i> Appraisal of heavy metal pollution in the water resources of Western Uttar Pradesh, India and associated risks. Environmental Advances, v. 8, p. 100230, jul. 2022. OZOKO, Daniel Chukwumeka; ONYEKWELU, Ifeoma Linda; AGHAMELU, Okechukwu Pius. Multivariate and health risks analysis of heavy metals in natural water sources around Enugu dumpsite, southeastern Nigeria. Applied Water Science, v. 12, n. 9, p. 224, set. 2022. UGOCHUKWU, Uzochukwu Cornelius <i>et al.</i> Sediments and Water Column Contamination by Heavy Metals in Ekulu River, Nigeria: Ecological and Human Health Risk Assessment. Asian Journal of Chemistry, v. 31, n. 3, p. 699–706, 2019. NGO, Huong Thi Thuy <i>et al.</i> Metal Pollution and Bioaccumulation in the Nhue-Day River Basin, Vietnam: Potential Ecological and Human Health Risks. International Journal of Environmental Research and Public Health, v. 18, n. 24, p. 13425, 20 dez. 2021.

Herramienta 14

Nombre	Redes neuronales artificiales (ANN)
Tipo	Modelo de machine learning
Objetivo	Predecir las concentraciones de metales pesados en el suelo y agua, con base en datos históricos y detectando patrones complejos entre variables de entrada (como ubicación, características del suelo, etc.) y los niveles de contaminantes.
Referencia bibliográfica	MAO, Changping <i>et al.</i> Spatial Distribution and Ecological Risk Assessment of Heavy Metals in the Sediment of a Tropical Mangrove Wetland on Hainan Island, China. Water, v. 14, n. 22, p. 3785, 21 nov. 2022.

Herramienta 15	
Nombre	Soporte de regresión vectorial (SVR)
Tipo	Modelo
Objetivo	Simular y predecir niveles de metales en el suelo, capturando relaciones no lineales entre variables de entrada y resultados, con buena capacidad de generalización.
Referencia bibliográfica	MAO, Changping <i>et al.</i> Spatial Distribution and Ecological Risk Assessment of Heavy Metals in the Sediment of a Tropical Mangrove Wetland on Hainan Island, China. Water , v. 14, n. 22, p. 3785, 21 nov. 2022.

Herramienta 16	
Nombre	Índice de contaminación de Nemerow (NPI)
Tipo	Indicador
Objetivo	Evaluar de manera integral el nivel de contaminación de los sedimentos por múltiples metales pesados. Combina el índice de un solo contaminante (Pi), que se calcula como la proporción entre la concentración del metal en el sedimento y su valor de referencia ambiental, con el valor máximo de Pi encontrado entre todos los metales analizados.
Referencia bibliográfica	ADAMU, C. I.; NGANJE, T. N.; EDET, Aniekan. Heavy metal contamination and health risk assessment associated with abandoned barite mines in Cross River State, southeastern Nigeria. Environmental Nanotechnology, Monitoring & Management, v. 3, p. 10–21, maio 2015. AN, Li; XU, Liang; FU, Yongsheng. Contamination and Risk Assessment of Heavy Metals in Lake Bed Sediment of a Large Lake Scenic Area in China. International Journal of Environmental Research and Public Health, v. 13, n. 7, p. 741, 21 jul. 2016. IORDACHE, Mihaela <i>et al.</i> Assessment of Heavy Metals Pollution in Sediments from Reservoirs of the Olt River as Tool for Environmental Risk Management. Revista de Chimie, v. 70, n. 12, p. 4153–4162, 19 jan. 2020. KANG, Mengxin <i>et al.</i> Spatial distribution characteristics and health risk assessment of heavy metals in surface sediment of the Hai River and its tributaries in Tianjin, China. Water Science and Technology, v. 84, n. 6, p. 1487–1497, 15 set. 2021.

Herramienta 17	
Nombre	Índice de riesgo no cancerígeno
Tipo	Indicador

Objetivo	Evaluar la potencialidad de efectos adversos en la salud humana, principalmente por exposición oral y dérmica a metales pesados en sedimentos.
Referencia bibliográfica	KANG, Mengxin <i>et al.</i> Spatial distribution characteristics and health risk assessment of heavy metals in surface sediment of the Hai River and its tributaries in Tianjin, China. Water Science and Technology , v. 84, n. 6, p. 1487–1497, 15 set. 2021.

Herramienta 18

Nombre	Riesgo cancerígeno (CR)
Tipo	Indicador
Objetivo	Estimar el riesgo potencial de desarrollar cáncer por exposición a metales pesados.
Referencia bibliográfica	HASAN, G. M. M. Anwarul <i>et al.</i> Distribution of Cr, Cd, Cu, Pb and Zn in organs of three selected local fish species of Turag river, Bangladesh and impact assessment on human health. Emerging Contaminants, v. 9, n. 1, p. 100197, mar. 2023. KANG, Mengxin <i>et al.</i> Spatial distribution characteristics and health risk assessment of heavy metals in surface sediment of the Hai River and its tributaries in Tianjin, China. Water Science and Technology, v. 84, n. 6, p. 1487–1497, 15 set. 2021. SALAZAR-CAMACHO, Carlos <i>et al.</i> A human health risk assessment of methylmercury, arsenic and metals in a tropical river basin impacted by gold mining in the Colombian Pacific region. Environmental Research, v. 212, p. 113120, set. 2022. SIDDIQUA, Ayesha <i>et al.</i> Evaluation of Water Quality and Its Potential Threats Along River Chenab Using Geo Statistical Techniques. Polish Journal of Environmental Studies, v. 30, n. 6, p. 5239–5254, 1 out. 2021.

Herramienta 19

Nombre	Factor de enriquecimiento (EF)
Tipo	Indicador
Objetivo	Determinar si la presencia de ciertos metales en los sedimentos es resultado de actividades humanas o procesos naturales. Calcula la relación entre la cantidad de un metal y un elemento de referencia (como Fe o Al) en el sedimento, comparándolo con la proporción en el suelo de fondo. Valoraciones altas indican posible enriquecimiento antrópico, mientras que valores cercanos a 1 sugieren origen natural.
Referencia bibliográfica	ADDO-BEDIAKO, Abraham; NUKERI, Sophy; KEKANA, Millicent. Heavy metal and metalloid contamination in the sediments of the Spekboom River, South Africa. Applied Water Science, v. 11, n. 7, p. 133, jul. 2021. EL-AMIER, Yasser A. <i>et al.</i> Ecological Risk Assessment of Heavy Metals along Three Main Drains in Nile Delta and Potential

	Phytoremediation by Macrophyte Plants. Plants , v. 9, n. 7, p. 910, 18 jul. 2020.
	TABLA-HERNANDEZ, J. et al. Assessment of Potential Toxic Metals in a Ramsar Wetland, Central Mexico and its Self-Depuration through <i>Eichhornia crassipes</i> . Water , v. 11, n. 6, p. 1248, 14 jun. 2019.

Herramienta 20

Nombre	Factor de bioconcentración (BCF)
Tipo	Indicador
Objetivo	Mide la capacidad de un organismo acuático para acumular sustancias químicas del agua. Un BCF mayor a 1 indica potencial de acumulación, y valores superiores a 100 requieren acción inmediata debido al riesgo de toxicidad.
Referencia bibliográfica	HOSSAIN, M. N. et al. Comparative seasonal assessment of pollution and health risks associated with heavy metals in water, sediment and Fish of Buriganga and Turag River in Dhaka City, Bangladesh. SN Applied Sciences , v. 3, n. 4, abr. 2021

Herramienta 21

Nombre	Cociente de peligrosidad objetivo (THQ)
Tipo	Indicador
Objetivo	evalúan el riesgo no carcinogénico asociado con la ingesta de metales pesados a través del consumo de pescado. Un THQ menor a 1 indica un riesgo insignificante, mientras que un valor superior a 1 sugiere un potencial riesgo para la salud
Referencia bibliográfica	CHAN, Wing Sze <i>et al.</i> Metal accumulations in aquatic organisms and health risks in an acid mine-affected site in South China. Environmental Geochemistry and Health, v. 43, n. 11, p. 4415–4440, nov. 2021. HASAN, G. M. M. Anwarul <i>et al.</i> Distribution of Cr, Cd, Cu, Pb and Zn in organs of three selected local fish species of Turag river, Bangladesh and impact assessment on human health. Emerging Contaminants, v. 9, n. 1, p. 100197, mar. 2023. HOSSAIN, M. N. et al. Comparative seasonal assessment of pollution and health risks associated with heavy metals in water, sediment and Fish of Buriganga and Turag River in Dhaka City, Bangladesh. SN Applied Sciences, v. 3, n. 4, abr. 2021 SADEGHI, Mahdi; NOROOZI, Mina. Carcinogenic and Non-Carcinogenic Risk Assessment of Heavy Metals in Water Resources of North East of Iran in 2018. Journal of Environmental Health and Sustainable Development, 27 jun. 2021.

Herramienta 22

Nombre	Ingesta diaria estimada (EDI)
--------	-------------------------------

Tipo	Indicador
Objetivo	Calcula la ingesta diaria de metales a través del consumo de pescado, evaluando el riesgo potencial para la salud de los consumidores.
Referencia bibliográfica	AN, Li; XU, Liang; FU, Yongsheng. Contamination and Risk Assessment of Heavy Metals in Lake Bed Sediment of a Large Lake Scenic Area in China. International Journal of Environmental Research and Public Health, v. 13, n. 7, p. 741, 21 jul. 2016. ELHADDAD, Engy et al. Risk Assessment and Hazardous Effects of Metal Contamination in <i>O. niloticus</i> and <i>S. galilaeus</i> from Four Islands of the River Nile. Bulletin of Environmental Contamination and Toxicology, v. 109, n. 5, p. 839–851, nov. 2022 HASAN, G. M. M. Anwarul <i>et al.</i> Distribution of Cr, Cd, Cu, Pb and Zn in organs of three selected local fish species of Turag river, Bangladesh and impact assessment on human health. Emerging Contaminants, v. 9, n. 1, p. 100197, mar. 2023. HOSSAIN, M. N. et al. Comparative seasonal assessment of pollution and health risks associated with heavy metals in water, sediment and Fish of Buriganga and Turag River in Dhaka City, Bangladesh. SN Applied Sciences, v. 3, n. 4, abr. 2021. NGO, Huong Thi Thuy et al. Metal Pollution and Bioaccumulation in the Nhue-Day River Basin, Vietnam: Potential Ecological and Human Health Risks. International Journal of Environmental Research and Public Health, v. 18, n. 24, p. 13425, 20 dez. 2021.

Herramienta 23

Nombre	Índices de calidad del agua (WQI)
Tipo	Indicador
Objetivo	Transformar múltiples parámetros de calidad del agua en un solo valor numérico que indique si el agua es adecuada o no para el consumo humano.
Referencia bibliográfica	SIDDIQUA, Ayesha <i>et al.</i> Evaluation of Water Quality and Its Potential Threats Along River Chenab Using Geo Statistical Techniques. Polish Journal of Environmental Studies, v. 30, n. 6, p. 5239–5254, 1 oct. 2021. YAN, Tao; SHEN, Shui-Long; ZHOU, Annan. Indices and models of surface water quality assessment: Review and perspectives. Environmental Pollution, v. 308, p. 119611, set. 2022.

Herramienta 23

Nombre	Dosis diaria promedio (ADD)
Tipo	Indicador
Objetivo	Calcular la cantidad de contaminante que una persona está expuesta diariamente a través de la ingestión de agua
Referencia bibliográfica	SIDDIQUA, Ayesha <i>et al.</i> Evaluation of Water Quality and Its Potential Threats Along River Chenab Using Geo Statistical Techniques. Polish Journal of Environmental Studies, v. 30, n. 6, p. 5239–5254, 1 oct. 2021.

Herramienta 24	
Nombre	Factor de riesgo ecológico (Er)
Tipo	Indicador
Objetivo	Evaluar el riesgo potencial que representan los metales en el ecosistema, considerando su toxicidad y concentración
Referencia bibliográfica	EL-AMIER, Yasser A. et al. Ecological Risk Assessment of Heavy Metals along Three Main Drains in Nile Delta and Potential Phytoremediation by Macrophyte Plants. Plants , v. 9, n. 7, p. 910, 18 jul. 2020.

Herramienta 25	
Nombre	Índice de riesgo total (PERI)
Tipo	Indicador
Objetivo	Evaluar el riesgo ecológico global considerando los niveles de diversos metales y su toxicidad acumulada
Referencia bibliográfica	EL-AMIER, Yasser A. et al. Ecological Risk Assessment of Heavy Metals along Three Main Drains in Nile Delta and Potential Phytoremediation by Macrophyte Plants. Plants, v. 9, n. 7, p. 910, 18 jul. 2020. HUANG, Xuexia <i>et al.</i> Distribution, Source and Risk Assessment of Heavy Metal(oid)s in Water, Sediments, and Corbicula Fluminea of Xijiang River, China. International Journal of Environmental Research and Public Health, v. 16, n. 10, p. 1823, 23 maio 2019. OJEKUNLE, Olusheyi Z. <i>et al.</i> Evaluation of surface water quality indices and ecological risk assessment for heavy metals in scrap yard neighbourhood. SpringerPlus, v. 5, n. 1, p. 560, dez. 2016. TABLA-HERNANDEZ, J. et al. Assessment of Potential Toxic Metals in a Ramsar Wetland, Central Mexico and its Self-Depuration through Eichhornia crassipes. Water, v. 11, n. 6, p. 1248, 14 jun. 2019.

Herramienta 26	
Nombre	Factor de bioacumulación de metales (BAF)
Tipo	Indicador
Objetivo	Evaluar la capacidad de las plantas acuáticas (macrófitas) para acumular metales pesados desde el sedimento o agua en sus tejidos, específicamente en raíces y partes aéreas (tallos o hojas). Se calcula como la relación entre la concentración de metales en la parte vegetal y en el sedimento o agua.
Referencia bibliográfica	EL-AMIER, Yasser A. et al. Ecological Risk Assessment of Heavy Metals along Three Main Drains in Nile Delta and Potential Phytoremediation by Macrophyte Plants. Plants, v. 9, n. 7, p. 910, 18 jul. 2020. HUANG, Xuexia <i>et al.</i> Distribution, Source and Risk Assessment of Heavy Metal(oid)s in Water, Sediments, and Corbicula Fluminea of Xijiang River, China. International Journal of Environmental Research and Public Health, v. 16, n. 10, p. 1823, 23 maio 2019.

	OUTA, James Omondi <i>et al.</i> Trace Elements in Crustaceans, Mollusks and Fish in the Kenyan Part of Lake Victoria: Bioaccumulation, Bioindication and Health Risk Analysis. Archives of Environmental Contamination and Toxicology , v. 78, n. 4, p. 589–603, maio 2020.
--	---

Herramienta 27

Nombre	Factor de translocación (TF)
Tipo	Indicador
Objetivo	Mide la proporción de metales pesados que una planta transfiere desde sus raíces hacia las partes aéreas (hojas, tallos, etc.)
Referencia bibliográfica	EL-AMIER, Yasser A. et al. Ecological Risk Assessment of Heavy Metals along Three Main Drains in Nile Delta and Potential Phytoremediation by Macrophyte Plants. Plants , v. 9, n. 7, p. 910, 18 jul. 2020. TABLA-HERNANDEZ, J. et al. Assessment of Potential Toxic Metals in a Ramsar Wetland, Central Mexico and its Self-Depuration through Eichhornia crassipes. Water , v. 11, n. 6, p. 1248, 14 jun. 2019.

Herramienta 28

Nombre	Análisis de componentes principales (PCA)
Tipo	Técnica estadística
Objetivo	Identificar posibles fuentes de contaminación, diferenciando los efectos de actividades humanas (agricultura, minería) y condiciones naturales en las concentraciones de metales en los suelos.
Referencia bibliográfica	MARRUGO-NEGRETE, José <i>et al.</i> Flood-induced metal contamination in the topsoil of floodplain agricultural soils: A case-study in Colombia. Land Degradation & Development , v. 30, n. 17, p. 2139–2149, nov. 2019. SU, Xiaomei <i>et al.</i> Spatial–Temporal Variations, Ecological Risk Assessment, and Source Identification of Heavy Metals in the Sediments of a Shallow Eutrophic Lake, China. Toxics , v. 10, n. 1, p. 16, 4 jan. 2022.

Herramienta 29

Nombre	Código de evaluación de riesgos (RAC)
Tipo	Código
Objetivo	Clasificar la disposición y la disponibilidad de los metales en diferentes formas químicas dentro del suelo, proporcionando una estimación del potencial de entrada en los procesos ecológicos y humanos
Referencia bibliográfica	IORDACHE, Mihaela <i>et al.</i> Assessment of Heavy Metals Pollution in Sediments from Reservoirs of the Olt River as Tool for Environmental Risk Management. Revista de Chimie , v. 70, n. 12, p. 4153–4162, 19 jan. 2020. MARRUGO-NEGRETE, José <i>et al.</i> Flood-induced metal contamination in the topsoil of floodplain agricultural soils: A case-study in Colombia.

	Land Degradation & Development, v. 30, n. 17, p. 2139–2149, nov. 2019. EL-SAADANI, Zozo <i>et al.</i> Environmental Geochemistry and Fractionation of Cadmium Metal in Surficial Bottom Sediments and Water of the Nile River, Egypt. Toxics, v. 10, n. 5, p. 221, 28 abr. 2022.
--	--

Herramienta 30

Nombre	Factor de acumulación biota-sedimento (BSF)
Tipo	Indicador
Objetivo	Evaluar la capacidad de los organismos acuáticos para acumular metales/metaloideos desde el sedimento. Esto permite entender el grado de exposición de los organismos a contaminantes y su potencial impacto en la salud de los ecosistemas acuáticos y en la cadena alimentaria
Referencia bibliográfica	HUANG, Xuexia <i>et al.</i> Distribution, Source and Risk Assessment of Heavy Metal(oid)s in Water, Sediments, and Corbicula Fluminea of Xijiang River, China. International Journal of Environmental Research and Public Health , v. 16, n. 10, p. 1823, 23 maio 2019.

Herramienta 31

Nombre	Riesgo de cáncer por exceso de vida (ELCR)
Tipo	Indicador
Objetivo	Estimar el riesgo de desarrollar cáncer a lo largo de la vida debido a la exposición a metales pesados a través de la ingestión de agua contaminada
Referencia bibliográfica	UGOCHUKWU, Uzochukwu Cornelius <i>et al.</i> Sediments and Water Column Contamination by Heavy Metals in Ekulu River, Nigeria: Ecological and Human Health Risk Assessment. Asian Journal of Chemistry , v. 31, n. 3, p. 699–706, 2019.

Herramienta 32

Nombre	Índice de metales (MI)
Tipo	Indicador
Objetivo	Evaluar la calidad del agua potable en función de la concentración de metales pesados. Se calcula comparando la concentración media de cada metal (Ci) con su concentración máxima permitida (MAC), y un valor de MI mayor a 1 indica una calidad de agua preocupante.
Referencia bibliográfica	ASTUTI, Ratna Dwi Puji <i>et al.</i> Risk identification of heavy metals in well water surrounds watershed area of Pangkajene, Indonesia. Gaceta Sanitaria, v. 35, p. S33–S37, 2021. OJEKUNLE, Olusheyi Z. <i>et al.</i> Evaluation of surface water quality indices and ecological risk assessment for heavy metals in scrap yard neighbourhood. SpringerPlus, v. 5, n. 1, p. 560, dez. 2016. YAN, Tao; SHEN, Shui-Long; ZHOU, Annan. Indices and models of surface water quality assessment: Review and perspectives. Environmental Pollution, v. 308, p. 119611, set. 2022.

Herramienta 33	
Nombre	Índice de contaminación por metales (MPI)
Tipo	Indicador
Objetivo	Medir la capacidad acumulativa de los peces para almacenar metales pesados. Compara contaminación entre sitios y especies.
Referencia bibliográfica	ELHADDAD, Engy et al. Risk Assessment and Hazardous Effects of Metal Contamination in <i>O. niloticus</i> and <i>S. galilaeus</i> from Four Islands of the River Nile. Bulletin of Environmental Contamination and Toxicology , v. 109, n. 5, p. 839–851, nov. 2022. CHAN, Wing Sze <i>et al.</i> Metal accumulations in aquatic organisms and health risks in an acid mine-affected site in South China. Environmental Geochemistry and Health , v. 43, n. 11, p. 4415–4440, nov. 2021.

Herramienta 34	
Nombre	Índice de peligro con lógica difusa (FHI)
Tipo	Indicador
Objetivo	Evaluar los riesgos no cancerígenos para la salud humana por exposición a metales pesados, especialmente cuando existen incertidumbres o variabilidad en los datos de entrada
Referencia bibliográfica	JAISWAL, Maneesh <i>et al.</i> Heavy metal contamination in the complete stretch of Yamuna River: A fuzzy logic approach for comprehensive health risk assessment. PLOS ONE , v. 17, n. 8, p. e0272562, 8 ago. 2022.

Herramienta 35	
Nombre	Evaluación de riesgos a la salud (HRA)
Tipo	Indicador
Objetivo	Determinar el riesgo potencial para humanos por exposición a los metales en el agua
Referencia bibliográfica	ZHANG, Long <i>et al.</i> Effects of Agriculture and Animal Husbandry on Heavy Metal Contamination in the Aquatic Environment and Human Health in Huangshui River Basin. Water , v. 14, n. 4, p. 549, 12 fev. 2022.

Herramienta 36	
Nombre	Modelo de Factorización Matricial Positiva (PMF 5.0)
Tipo	Herramienta estadística
Objetivo	Identificar y cuantificar las fuentes de contaminación, separando contribuciones naturales y antropogénicas.
Referencia bibliográfica	ZHANG, Long <i>et al.</i> Effects of Agriculture and Animal Husbandry on Heavy Metal Contamination in the Aquatic Environment and Human Health in Huangshui River Basin. Water , v. 14, n. 4, p. 549, 12 fev. 2022.

Herramienta 37	
Nombre	Índice de evaluación de elementos traza (TEI)
Tipo	Indicador
Objetivo	Evaluar la calidad del agua considerando la concentración total de metales en relación con sus límites máximos admisibles.
Referencia bibliográfica	RAKIB, Md. Refat Jahan <i>et al.</i> Assessment of trace element toxicity in surface water of a fish breeding river in Bangladesh: a novel approach for ecological and health risk evaluation. Toxin Reviews , v. 41, n. 2, p. 420–436, 3 abr. 2022.

Herramienta 38	
Nombre	Índice de contaminación de Nemerow modificado (mPI)
Tipo	Indicador
Objetivo	Evaluar el nivel general de contaminación del sedimento por metales pesados, integrando tanto el valor promedio como el valor máximo de enriquecimiento para reflejar de forma más precisa el riesgo ambiental total en cada sitio.
Referencia bibliográfica	NGO, Huong Thi Thuy et al. Metal Pollution and Bioaccumulation in the Nhue-Day River Basin, Vietnam: Potential Ecological and Human Health Risks. International Journal of Environmental Research and Public Health , v. 18, n. 24, p. 13425, 20 dez. 2021.

Herramienta 39	
Nombre	Índice de riesgo ecológico potencial ampliado y modificado (emRI)
Tipo	Indicador
Objetivo	Estimar de manera precisa el riesgo ecológico potencial de múltiples metales pesados presentes en los sedimentos de un ecosistema, considerando su toxicidad relativa, concentración y el efecto combinado de estos contaminantes
Referencia bibliográfica	NGO, Huong Thi Thuy et al. Metal Pollution and Bioaccumulation in the Nhue-Day River Basin, Vietnam: Potential Ecological and Human Health Risks. International Journal of Environmental Research and Public Health , v. 18, n. 24, p. 13425, 20 dez. 2021.

Herramienta 40	
Nombre	Ingesta Diaria Crónica (CDI)
Tipo	Indicador
Objetivo	Calcular la cantidad promedio diaria de un metal pesado que una persona ingiere durante un periodo prolongado, a través del consumo de agua contaminada, para estimar el riesgo crónico de exposición a largo plazo.
Referencia bibliográfica	AFOLAYAN, David Oluwasegun <i>et al.</i> Physicochemical Studies for Risk Identification, Assessment, and Characterization of Artisanal Barite Mining in Nigeria. Sustainability , v. 13, n. 23, p. 12982, 24 nov. 2021.

Herramienta 41	
Nombre	Individuo Máximamente Expuesto (MEI)
Tipo	Indicador
Objetivo	Estimar la dosis diaria más alta de exposición a metales que puede recibir una persona altamente expuesta, considerando su comportamiento, duración y frecuencia de exposición. Sirve para identificar poblaciones críticas en riesgo.
Referencia bibliográfica	AFOLAYAN, David Oluwasegun <i>et al.</i> Physicochemical Studies for Risk Identification, Assessment, and Characterization of Artisanal Barite Mining in Nigeria. Sustainability , v. 13, n. 23, p. 12982, 24 nov. 2021.

Herramienta 42	
Nombre	Cociente de peligro modificado (mHQ)
Tipo	Indicador
Objetivo	Evaluar el nivel de peligro que representa cada metal individual en el sedimento, comparando su concentración con valores de referencia como TEL (nivel por debajo del cual no se esperan efectos adversos), PEL (nivel a partir del cual es probable que ocurran efectos negativos) y SEL (nivel donde los efectos adversos son severos y casi seguros) para determinar su impacto potencial en los organismos acuáticos.
Referencia bibliográfica	HAGHNAZAR, Hamed <i>et al.</i> Potentially toxic elements contamination in surface sediment and indigenous aquatic macrophytes of the Bahmanshir River, Iran: Appraisal of phytoremediation capability. Chemosphere , v. 285, p. 131446, dez. 2021.

Herramienta 43	
Nombre	Índice de contaminación ecológica (ECI)
Tipo	Indicador
Objetivo	Medir el riesgo ecológico acumulado que representan todos los metales presentes en el sedimento de un ecosistema acuático. Este índice toma en cuenta la cantidad de cada metal y su relación con los demás, utilizando el análisis de componentes principales.
Referencia bibliográfica	HAGHNAZAR, Hamed <i>et al.</i> Potentially toxic elements contamination in surface sediment and indigenous aquatic macrophytes of the Bahmanshir River, Iran: Appraisal of phytoremediation capability. Chemosphere , v. 285, p. 131446, dez. 2021.

Herramienta 44	
Nombre	Índice de gravedad de la contaminación (CSI)
Tipo	Indicador
Objetivo	Determinar el nivel de severidad de la contaminación tóxica (ecotoxicidad) en los sedimentos del río, evaluando cuánto se superan ciertos valores umbral establecidos para los metales. Utiliza referencias como: • ERL (Effect Range Low): valor por debajo del cual los efectos tóxicos son poco frecuentes

	• ERM (Effect Range Median): valor por encima del cual los efectos tóxicos son muy probables.
Referencia bibliográfica	HAGHNAZAR, Hamed <i>et al.</i> Potentially toxic elements contamination in surface sediment and indigenous aquatic macrophytes of the Bahmanshir River, Iran: Appraisal of phytoremediation capability. Chemosphere , v. 285, p. 131446, dez. 2021.

Herramienta 45

Nombre	Índice de riesgo tóxico (TRI)
Tipo	Indicador
Objetivo	Evaluar el nivel total de toxicidad que puede causar la presencia de varios metales en el ecosistema acuático. Para ello, compara las concentraciones medidas de los metales con dos puntos de referencia: • TEL (Threshold Effect Level): concentración por debajo de la cual no se esperan efectos adversos. • PEL (Probable Effect Level): concentración por encima de la cual es probable que ocurran efectos negativos. El TRI ofrece una medida compuesta del riesgo tóxico, útil para identificar si el ecosistema está en condiciones seguras o si existe un peligro significativo para la fauna acuática
Referencia bibliográfica	HAGHNAZAR, Hamed <i>et al.</i> Potentially toxic elements contamination in surface sediment and indigenous aquatic macrophytes of the Bahmanshir River, Iran: Appraisal of phytoremediation capability. Chemosphere , v. 285, p. 131446, dez. 2021.

Herramienta 46

Nombre	Cociente de la Guía de Calidad de los sedimentos (SQG-Q)
Tipo	Indicador
Objetivo	Evaluar y clasificar el grado de contaminación en sedimentos, proporcionando un marco para determinar el riesgo ambiental asociado con la presencia de contaminantes. Este índice ayuda a identificar la toxicidad potencial de los sedimentos y a guiar la toma de decisiones en la gestión y remediación de áreas contaminadas.
Referencia bibliográfica	NGO, Huong Thi Thuy <i>et al.</i> Metal Pollution and Bioaccumulation in the Nhue-Day River Basin, Vietnam: Potential Ecological and Human Health Risks. International Journal of Environmental Research and Public Health, v. 18, n. 24, p. 13425, 20 dez. 2021. SHOJAEZADEH, Shahab Aldin <i>et al.</i> Probabilistic hazard assessment of contaminated sediment in rivers. Science of The Total Environment, v. 703, p. 134875, fev. 2020.

Herramienta 47

Nombre	Cociente de toxicidad ambiental (ETQ)
Tipo	Indicador
Objetivo	Evaluar el riesgo de toxicidad de los sedimentos al calcular la toxicidad acumulativa de varios elementos en función de sus concentraciones y puntajes totales
Referencia bibliográfica	MAFTEI, Andreea E. <i>et al.</i> Spatial Distribution of Minor Elements in the Tazlău River Sediments: Source Identification and Evaluation of

	Ecological Risk. International Journal of Environmental Research and Public Health , v. 16, n. 23, p. 4664, 22 nov. 2019.
--	--

Herramienta 48

Nombre	Índice de peligro oral (HI _{oral})
Tipo	Indicador
Objetivo	Medir el riesgo potencial para la salud humana a través de la ingestión de agua contaminada con metales pesados.
Referencia bibliográfica	IMRAN, Uzma <i>et al.</i> Health risk assessment of the exposure of heavy metal contamination in surface water of lower Sindh, Pakistan. SN Applied Sciences , v. 1, n. 6, p. 589, jun. 2019.

Herramienta 49

Nombre	Índice dérmico (HI _{dérmico})
Tipo	Indicador
Objetivo	Evaluar el riesgo asociado a la absorción de metales pesados a través de la piel
Referencia bibliográfica	IMRAN, Uzma <i>et al.</i> Health risk assessment of the exposure of heavy metal contamination in surface water of lower Sindh, Pakistan. SN Applied Sciences , v. 1, n. 6, p. 589, jun. 2019.

Herramienta 50

Nombre	Ingesta semanal estimada (EWI)
Tipo	Indicador
Objetivo	Evaluar el riesgo potencial de exposición humana al metilmercurio (MeHg) a través del consumo de pescado. Se calcula utilizando la concentración de MeHg en el pescado, la tasa de ingesta semanal de pescado y el peso corporal de la persona. Esto permite determinar si la ingesta de pescado supera los límites de seguridad establecidos para la salud.
Referencia bibliográfica	SALAZAR-CAMACHO, Carlos <i>et al.</i> A human health risk assessment of methylmercury, arsenic and metals in a tropical river basin impacted by gold mining in the Colombian Pacific region. Environmental Research , v. 212, p. 113120, set. 2022.

Herramienta 51

Nombre	Modelo USEtox
Tipo	Modelo
Objetivo	Estimar los efectos tóxicos potenciales para humanos y ecosistemas acuáticos de distintos contaminantes
Referencia bibliográfica	ZAIT, Roxana <i>et al.</i> Priority Pollutants Effects on Aquatic Ecosystems Evaluated through Ecotoxicity, Impact, and Risk Assessments. Water , v. 14, n. 20, p. 3237, 14 out. 2022.

Herramienta 52	
Nombre	Factores de caracterización (CFs)
Tipo	Factor
Objetivo	Cuantificar el potencial de toxicidad (efecto dañino) que puede causar cada contaminante prioritario, tanto en la salud humana como en los ecosistemas acuáticos, por cada kilogramo liberado al ambiente
Referencia bibliográfica	ZAIT, Roxana <i>et al.</i> Priority Pollutants Effects on Aquatic Ecosystems Evaluated through Ecotoxicity, Impact, and Risk Assessments. Water , v. 14, n. 20, p. 3237, 14 out. 2022.

Herramienta 53	
Nombre	Evaluación del riesgo ecológico
Tipo	Indicador
Objetivo	Medir el riesgo real de ocurrencia de un daño ambiental, es decir, la probabilidad de que el impacto ocurra, considerando la toxicidad del contaminante y su nivel de exposición
Referencia bibliográfica	ZAIT, Roxana <i>et al.</i> Priority Pollutants Effects on Aquatic Ecosystems Evaluated through Ecotoxicity, Impact, and Risk Assessments. Water , v. 14, n. 20, p. 3237, 14 out. 2022.

Herramienta 54	
Nombre	Impacto ambiental (EI)
Tipo	Indicador
Objetivo	Evaluar la magnitud del daño potencial causado por un contaminante al medio ambiente, en el caso del recurso hídrico, considerando su concentración y su importancia ecológica.
Referencia bibliográfica	ZAIT, Roxana <i>et al.</i> Priority Pollutants Effects on Aquatic Ecosystems Evaluated through Ecotoxicity, Impact, and Risk Assessments. Water , v. 14, n. 20, p. 3237, 14 out. 2022.

Herramienta 55	
Nombre	Modelo de simulación basado en agentes (ABM)
Tipo	Modelo
Objetivo	Apoyar la toma de decisiones en comunidades indígenas mediante la simulación de escenarios complejos relacionados con la salud y el medio ambiente, como enfermedades transmitidas por el agua, eventos masivos o inundaciones. Este modelo permite visualizar de manera participativa cómo podrían desarrollarse distintas situaciones, integrando tanto datos técnicos como saberes culturales y tradicionales, con el fin de fortalecer la resiliencia comunitaria y facilitar el diálogo colectivo frente a posibles riesgos.
Referencia bibliográfica	MCDONALD, Gavin Wade <i>et al.</i> Case Study of Collaborative Modeling in an Indigenous Community. Water , v. 14, n. 17, p. 2601, 24 ago. 2022.

Herramienta 56	
Nombre	Índice de resiliencia hídrica

Tipo	Indicador
Objetivo	Evaluar la capacidad de un río para resistir, absorber y recuperarse de la contaminación generada por fuentes puntuales de origen antrópico.
Referencia bibliográfica	MIRAUDA, Domenica <i>et al.</i> Assessing the fluvial system resilience of the river Bacchiglione to point sources of pollution in Northeast Italy: a novel Water Resilience Index (WRI) approach. Environmental Science and Pollution Research , v. 28, n. 27, p. 36775–36792, jul. 2021.

Herramienta 57

Nombre	Torneo de amenazas múltiples (MHT) – Juego
Tipo	Juego
Objetivo	Facilitar la planificación colaborativa de los recursos hídricos y la mitigación de riesgos ante múltiples amenazas relacionadas con el agua (como inundaciones, sequías y contaminación), involucrando a los actores de la cuenca hidrográfica en un proceso participativo y educativo. Esta herramienta corresponde a un juego (Collaborative Serious Game) el cual está apoyado por una plataforma digital de soporte a decisiones (DST).
Referencia bibliográfica	TEAGUE, A. <i>et al.</i> A collaborative serious game for water resources planning and hazard mitigation. International Journal of Disaster Risk Reduction , v. 53, p. 101977, fev. 2021.

Herramienta 59

Nombre	Índice integrador de respuesta de biomarcadores (IBR)
Tipo	Indicador
Objetivo	Proporcionar una visión holística del nivel de estrés que experimenta un organismo al estar expuesto a una mezcla de contaminantes, permitiendo comparar sitios y periodos mediante un único valor numérico. Facilita la interpretación global de respuestas biológicas complejas
Referencia bibliográfica	BERTRAND, Lidwina <i>et al.</i> Usefulness of a freshwater macrophyte (Potamogeton pusillus) for an environmental risk assessment in a multi-source contaminated basin. Chemosphere , v. 222, p. 1003–1016, maio 2019.

Herramienta 60

Nombre	Modelo REILP
Tipo	Modelo
Objetivo	Optimizar la planificación ambiental y económica de cuencas hidrográficas bajo condiciones de incertidumbre, considerando simultáneamente el retorno económico del sistema y el nivel de riesgo asociado a las decisiones tomadas
Referencia bibliográfica	ZHANG, Xiaoling <i>et al.</i> A Risk Explicit Interval Linear Programming Model for Uncertainty-Based Environmental Economic Optimization in the Lake Fuxian Watershed, China. The Scientific World Journal , v. 2013, n. 1, p. 824078, jan. 2013.

Herramienta 60	
Nombre	Fracción potencialmente afectada (PAF)
Tipo	Indicador
Objetivo	Cuantificar el riesgo ecológico de una sustancia química en un ecosistema acuático, utilizando la distribución de sensibilidad de especies (SSD). Sirve para estimar qué fracción de especies podría experimentar efectos adversos debido a una concentración específica de un contaminante en el ambiente
Referencia bibliográfica	WANG, Ying <i>et al.</i> Water Quality Criteria and Ecological Risk Assessment of Typical Transition Metals in South Asia. International Journal of Environmental Research and Public Health , v. 19, n. 23, p. 16125, 2 dez. 2022.
Herramienta 61	
Nombre	Modelado de Distribución de Especies Sensibles (SSD Modeling)
Tipo	Modelo
Objetivo	Estimar cómo responde una comunidad de especies a la exposición de un contaminante, permitiendo calcular umbrales ecológicos seguros y riesgos ecológicos.
Referencia bibliográfica	WANG, Ying <i>et al.</i> Water Quality Criteria and Ecological Risk Assessment of Typical Transition Metals in South Asia. International Journal of Environmental Research and Public Health , v. 19, n. 23, p. 16125, 2 dez. 2022.
Herramienta 62	
Nombre	Modelo de acumulación de contaminantes (PAM)
Tipo	Modelo
Objetivo	Evaluar la acumulación y transferencia de metales pesados en agua, suelo y sedimentos a lo largo del tiempo, y estimar los riesgos para la salud humana derivados de esa contaminación en una cuenca hidrográfica.
Referencia bibliográfica	HAN, Ruru; ZHOU, Beihai; CHEN, Huilun. Spatio-Temporal Distribution of Environmental Health Risk of Heavy Metals in Industrial Wastewater of China during 1999–2018. International Journal of Environmental Research and Public Health , v. 18, n. 11, p. 5920, 31 maio 2021.
Herramienta 63	
Nombre	Redes Bayesianas (BNs)
Tipo	Modelo probabilístico gráfico
Objetivo	Integrar múltiples fuentes de información (datos medidos, simulaciones, juicios expertos) para predecir de forma cuantitativa los riesgos ecológicos y a la salud humana ante accidentes de contaminación por metales pesados a escala de cuenca hidrográfica.
Referencia bibliográfica	LIU, Jing <i>et al.</i> Quantifying and predicting ecological and human health risks for binary heavy metal pollution accidents at the watershed

	scale using Bayesian Networks. Environmental Pollution , v. 269, p. 116125, jan. 2021
--	--

Herramienta 64

Nombre	Índices de estado trófico (TSI)
Tipo	Indicador
Objetivo	Evaluar el nivel de eutrofización en lagos y embalses, vinculado al crecimiento de algas y bacterias.
Referencia bibliográfica	YAN, Tao; SHEN, Shui-Long; ZHOU, Annan. Indices and models of surface water quality assessment: Review and perspectives. Environmental Pollution , v. 308, p. 119611, set. 2022.

Herramienta 65

Nombre	ARTEM-WQ
Tipo	Sistema
Objetivo	Evaluar y gestionar riesgos en la producción de agua potable en servicios de pequeña y mediana escala. Es un Sistema de Soporte a Decisiones (DSS).
Referencia bibliográfica	DELPLA, I. <i>et al.</i> Impacts of climate change on surface water quality in relation to drinking water production. v. 35, p. 1225–1233, 2009.

Herramienta 66

Nombre	Riesgo cancerígeno objetivo (TCR)
Tipo	Indicador
Objetivo	Estima la probabilidad de desarrollar cáncer a lo largo de la vida debido a la exposición a carcinógenos. Se utiliza para evaluar el riesgo potencial de desarrollar cáncer a través de diferentes vías de exposición, como la ingestión de alimentos contaminados o la exposición ambiental.
Referencia bibliográfica	HASAN, G. M. M. Anwarul <i>et al.</i> Distribution of Cr, Cd, Cu, Pb and Zn in organs of three selected local fish species of Turag river, Bangladesh and impact assessment on human health. Emerging Contaminants , v. 9, n. 1, p. 100197, mar. 2023. KANG, Mengxin <i>et al.</i> Spatial distribution characteristics and health risk assessment of heavy metals in surface sediment of the Hai River and its tributaries in Tianjin, China. Water Science and Technology , v. 84, n. 6, p. 1487–1497, 15 set. 2021. SALAZAR-CAMACHO, Carlos <i>et al.</i> A human health risk assessment of methylmercury, arsenic and metals in a tropical river basin impacted by gold mining in the Colombian Pacific region. Environmental Research , v. 212, p. 113120, set. 2022. SIDDIQUA, Ayesha <i>et al.</i> Evaluation of Water Quality and Its Potential Threats Along River Chenab Using Geo Statistical Techniques. Polish Journal of Environmental Studies , v. 30, n. 6, p. 5239–5254, 1 out. 2021.

Apéndice C. Matriz de impactos cruzados para MICMAC

A continuación se presenta la matriz de impactos cruzados utilizada para el procesamiento de los aspectos socioambientales en el software MICMAC.

LINK:

https://1drv.ms/x/c/25e26dfe957b7757/EeYnOefgkqJJU_k32kHaGABZmcWjQsXvt1PdQU4i4rkjQ?e=OIeEfD

MATRIZ DE IMPACTOS CRUZADOS (INFLUENCIA VS DEPENDENCIA)		Afectación a la biodiversidad acuática y terrestre local	Afectación a la calidad de vida	Afectación a la salud del ecosistema	Afectación a la salud humana	Afectación a la seguridad hídrica	Afectación de dimensiones socioculturales	Afectación a la integridad y equilibrio del ecosistema	Alteración de las condiciones geológicas, topográficas y geomorfológicas	Alteración de las condiciones hidrogeológicas	Alteración geomorfológica del cauce	Ausencia de políticas públicas y directrices para el consumo de pescado contaminado	Bioacumulación y biomagnificación de metales pesados en la cadena trófica acuática y terrestre	Biodisponibilidad de metales pesados	Cambio en el uso del suelo	Contaminación causada por residuos sólidos peligrosos y/o tóxicos
Número	Variables	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
1	Afectación a la biodiversidad acuática y terrestre local	0	2	3	2	2	2	3	0	0	0	1	3	1	2	0
2	Afectación a la calidad de vida	2	0	0	3	1	3	1	0	0	0	0	0	0	2	1
3	Afectación a la salud del ecosistema	3	1	0	3	2	2	3	1	1	1	0	1	1	1	1
4	Afectación a la salud humana	2	3	3	0	0	3	2	0	0	0	1	0	0	0	0
5	Afectación a la seguridad hídrica	2	3	2	0	0	2	3	0	2	1	1	1	1	1	0
6	Afectación de dimensiones socioculturales	1	2	3	2	2	0	2	0	1	1	1	0	0	1	2
7	Afectación a la integridad y equilibrio del ecosistema	3	1	3	1	2	0	0	2	2	2	0	2	2	3	3
8	Alteración de las condiciones geológicas, topográficas y geomorfológicas	0	0	1	0	0	0	1	0	2	3	0	1	1	2	2
9	Alteración de las condiciones hidrogeológicas	0	0	0	0	1	0	2	3	0	1	0	1	1	2	1
10	Alteración geomorfológica del cauce	0	0	1	0	0	0	2	3	2	0	0	1	1	2	0
11	Ausencia de políticas públicas y directrices para el consumo de pescado contaminado	3	1	0	2	1	2	0	0	0	0	0	2	0	0	1
12	Bioacumulación y biomagnificación de metales pesados en la cadena trófica acuática y terrestre	2	2	1	0	2	1	2	1	0	0	3	0	2	0	0
13	Biodisponibilidad de metales pesados	2	0	2	0	2	0	2	1	0	0	3	1	0	0	1
14	Cambio en el uso del suelo	0	1	0	1	0	2	2	2	1	2	1	0	2	0	1
15	Contaminación causada por residuos sólidos peligrosos y/o tóxicos	0	1	1	0	0	2	3	0	0	0	3	0	0	2	0
16	Contaminación del agua por metales pesados	0	1	2	0	2	2	3	2	1	3	3	0	1	2	3
17	Contaminación del suelo y sedimentos por metales pesados	0	1	2	0	0	2	3	2	1	3	3	0	1	2	3
18	Débil fiscalización de normas y políticas ambientales	0	2	0	2	0	3	2	0	0	0	3	0	0	1	0
19	Deforestación	1	1	2	0	0	2	3	2	0	3	0	0	0	2	0
20	Deposición atmosférica de metales pesados	0	1	2	0	0	1	2	1	0	1	2	0	0	2	2
21	Disminución de la capacidad de resiliencia de los ríos	2	1	3	0	1	0	2	2	1	3	1	1	1	2	2
22	Emisiones de contaminantes atmosféricos	0	1	0	0	0	2	3	1	0	2	2	0	0	2	1
23	Erosión	0	0	2	0	0	1	2	2	0	3	0	0	0	2	0
24	Existencia de fuente de contaminación difusa	0	1	0	0	0	2	3	2	1	3	2	1	2	2	2
25	Exposición humana a metales pesados por ingesta de alimentos o agua	2	3	3	2	3	2	3	0	1	0	3	3	3	2	3
26	Inclusión del comportamiento climático de la región	0	0	1	0	1	0	1	2	1	3	0	1	1	1	1
27	Limitación en el uso recreativo del río	0	0	2	0	2	1	2	0	0	1	0	1	2	1	2
28	Limitaciones en la navegabilidad del río	0	1	3	0	2	2	3	3	0	3	0	0	0	2	0
29	Localización cercana a fuentes hídricas contaminadas	0	2	2	0	1	1	3	1	0	2	0	1	1	2	2
30	Movilización de metales pesados por ácidos en suelos y aguas	0	0	2	0	1	0	3	2	1	3	1	2	3	2	3
31	Movilización de metales pesados por escorrentía	0	0	2	0	1	0	3	2	1	3	1	2	3	2	3
32	Movilización de metales pesados por inundación	0	0	2	0	1	0	3	2	1	3	1	2	3	2	3
33	Ocupación irregular del entorno de las áreas preservadas	0	2	1	1	0	1	1	0	2	0	0	0	0	2	0
34	Pérdida de cosechas por metales pesados	1	1	2	0	1	1	2	0	0	0	1	2	2	1	2
35	Persistencia de metales pesados en el ambiente	2	0	2	0	1	0	2	1	1	1	2	3	3	2	2
36	Evidencia de prácticas agrícolas insostenibles	1	1	1	1	0	2	1	0	1	0	0	0	0	2	2
37	Presencia de actividades del sector agropecuario	1	1	1	0	1	2	1	0	1	0	2	0	0	2	2
38	Presencia de actividades industriales y mineras	1	1	1	0	1	2	2	1	1	2	2	0	0	3	2
39	Presencia de áreas ambientales protegidas	2	0	2	0	1	0	2	1	0	1	0	0	0	1	0
40	Presencia de pasivos ambientales mineros	1	1	1	0	1	2	2	2	1	3	2	0	0	3	2
41	Presencia de rellenos sanitarios o sitios de disposición final de residuos sólidos	1	2	1	0	0	2	1	1	0	1	1	0	0	1	1
42	Presión antrópica por crecimiento poblacional y migración	2	3	2	1	1	2	1	0	0	0	2	2	1	1	0
43	Removilización de contaminantes en los sistemas acuáticos	0	0	1	0	1	0	1	1	2	3	1	0	0	2	1
44	Saneamiento ambiental inadecuado	2	2	1	1	2	2	2	2	1	1	2	2	1	2	3
45	Uso inadecuado de los recursos hídricos	0	1	1	0	2	2	2	2	2	2	1	1	1	2	1
	Dependencia (Vertical)	39	45	64	14	37	46	78	48	22	57	48	25	31	57	48

Fuente: Elaboración propia (2025)