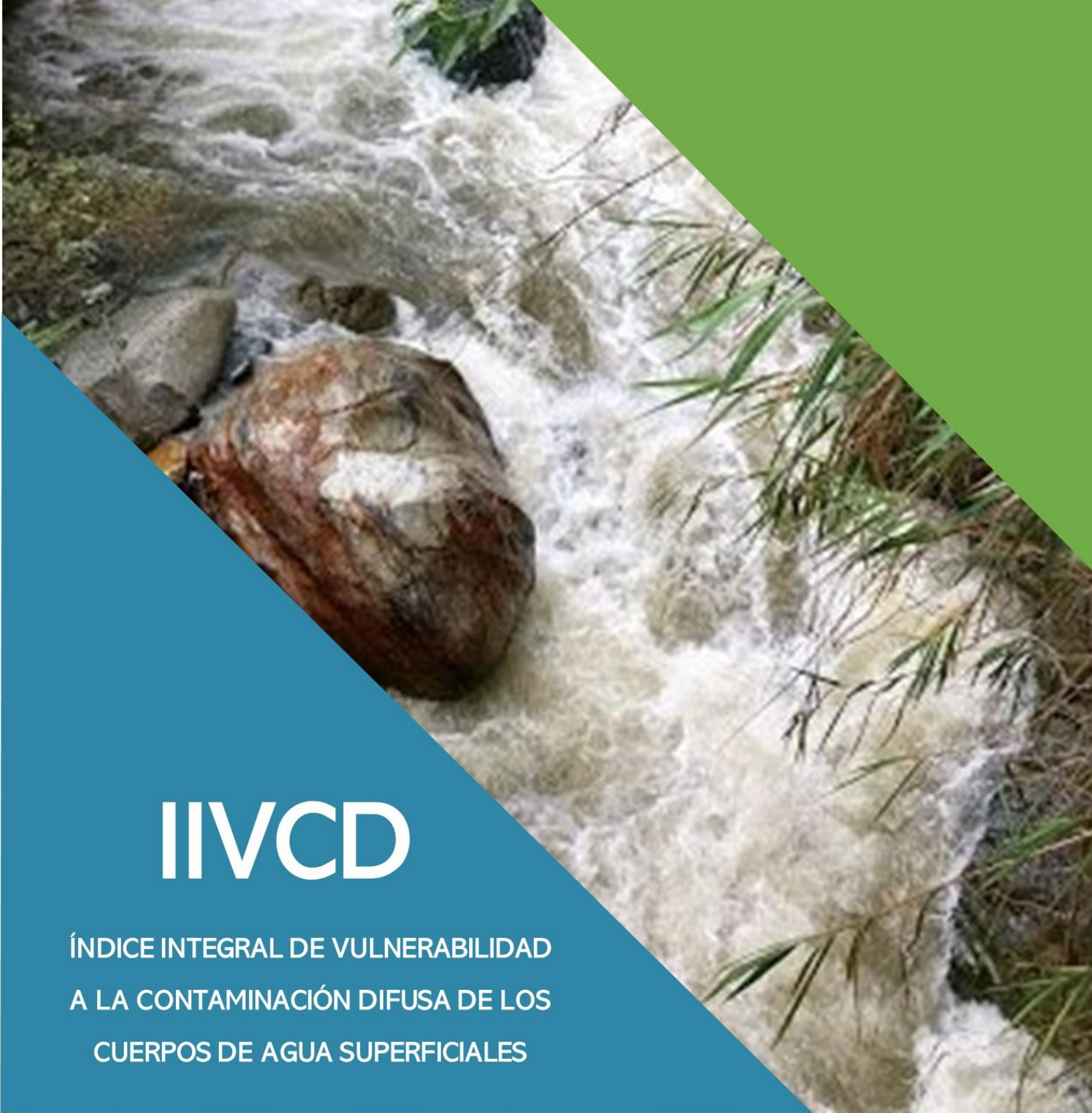




IIVCD

ÍNDICE INTEGRAL DE VULNERABILIDAD
A LA CONTAMINACIÓN DIFUSA DE LOS
CUERPOS DE AGUA SUPERFICIALES

Elaborado por:

Ana María Buitrago Ramírez

Dirigido por:

Andrés Echeverri Sánchez



**ÍNDICE INTEGRAL DE VULNERABILIDAD A LA CONTAMINACIÓN DIFUSA DE LOS
CUERPOS DE AGUA SUPERFICIALES**

**ANA MARÍA BUITRAGO RAMÍREZ
ADMINISTRADORA AMBIENTAL
CÓDIGO: 202200789**

**DIRECTOR:
ANDRÉS ECHEVERRI SÁNCHEZ
PROFESOR ASOCIADO UNIVERSIDAD DEL VALLE**

**UNIVERSIDAD DEL VALLE
FACULTAD DE INGENIERÍA
ESCUELA DE INGENIERÍA DE LOS RECURSOS NATURALES Y DEL AMBIENTE
MAESTRÍA EN GESTIÓN INTEGRADA DE RECURSOS HÍDRICOS
SEDE SANTIAGO DE CALI, 2022**

DEDICATORIA

A Dios, por haberme puesto en el lugar y momento correcto.

A la Ana del 2019, gracias por haber sido tan fuerte.

A Paola Andrea Zambrano, sin vos esto no hubiese sido posible, gracias, amiga; Si caminas solo, irás más rápido; si caminas acompañado, llegarás más lejos.

Dedico este estudio a la memoria de mi madre, Mariela Ramírez Monsalve, mi primer encuentro con un ángel. Gracias por darme todo, sé que aún es pronto para acompañarte, pero me consuela saber que estás en un mejor lugar. Te llevo en mi mente y en mi corazón cada segundo que vivo.

AGRADECIMIENTOS

Al profesor Andrés Echeverry Sánchez, mi director. Gracias por su orientación, por compartirme sus conocimientos y darme la libertad de crear, pero, sobre todo, gracias por ser tan humano, por creer en mí cuando ni yo misma creí ser capaz de lograrlo y por ser el profesor más inspirador.

A la Maestría en Gestión Integrada de los Recursos Hídricos y la Universidad del Valle por todos los conocimientos adquiridos que me permitieron realizar este trabajo.

CONTENIDO

1. INTRODUCCIÓN.....	8
1.1. Objetivos	10
1.1.1. Objetivo general	10
1.1.2. Objetivos específicos.....	10
1.2. Estado del arte	10
1.3. Marco teórico.....	15
1.3.1. Gestión integrada de recursos hídricos.....	15
1.3.2. Contaminación difusa de origen agrícola.....	17
1.3.3. Modelos de análisis multicriterio	19
1.3.4. Análisis espacial y sistemas de información geográfica (SIG)	20
1.3.5. Concepto de amenaza.....	21
1.3.6. Concepto de vulnerabilidad	22
1.3.7. Riesgo de contaminación.....	24
2. DISEÑO METODOLÓGICO	25
2.1. Esquema metodológico general.....	25
2.2. Selección de los parámetros determinantes de la vulnerabilidad de las fuentes hídricas a la contaminación difusa de origen agrícola	25
2.3. Construcción de un método para la estimación de la vulnerabilidad de las fuentes hídricas superficiales a la contaminación difusa de origen agrícola.....	29
2.4. Aplicación del método construido para la estimación de la vulnerabilidad de los cuerpos de agua superficiales a la contaminación difusa de origen agrícola en un caso de estudio	36
3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN	39
3.1. Parámetros determinantes de la vulnerabilidad de las fuentes hídricas a la contaminación difusa de origen agrícola	39
3.2. Índice Integral de Vulnerabilidad a la Contaminación Difusa (IIVCD) de los cuerpos de agua superficiales	45
3.2.1. Operacionalización y categorización de parámetros de vulnerabilidad	45
3.2.2. Asignación de pesos a los parámetros de vulnerabilidad.....	54
3.2.3. Ecuación final para el cálculo del IIVCD	61
3.3. Aplicación del IIVCD en un caso de estudio: cuenca del río Guachal	62
3.3.1. Parámetro indicador de declividad (I_s)	62
3.3.2. Parámetro indicador de erosividad (I_R).....	63

3.3.3.	Parámetro indicador de escorrentía (I_{CN})	65
3.3.4.	Parámetro indicador de conectividad hidrográfica (I_{CH})	76
3.3.5.	Parámetro indicador de erodabilidad (I_K)	82
3.3.6.	Parámetro indicador de calidad del agua (ICA).....	85
3.3.7.	Cálculo de la vulnerabilidad integral a partir del IIVCD en la cuenca del río Guachal 89	
4.	CONCLUSIONES.....	94
5.	RECOMENDACIONES.....	95
6.	REFERENCIAS	96

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 2-1.	Palabras clave y ecuaciones de búsqueda para el análisis bibliométrico	26
Tabla 2-2.	Escala de comparación pareada de parámetros	33
Tabla 2-3.	Matriz de calificación pareada para los parámetros de vulnerabilidad	33
Tabla 2-4.	Información base para el cálculo del IIVCD.....	37
Tabla 3-1.	Matriz preliminar de parámetros de vulnerabilidad	41
Tabla 3-2.	Matriz definitiva de parámetros de vulnerabilidad.....	42
Tabla 3-3.	Categorización y normalización del indicador conectividad hidrográfica (I_{CH})..	47
Tabla 3-4.	Funciones de los subíndices para cada parámetro del ICAUCA	48
Tabla 3-5.	Categorización y normalización del indicador de calidad del agua	49
Tabla 3-6.	Categorización y normalización del indicador de declividad	49
Tabla 3-7.	Categorización y normalización del indicador de erodabilidad	50
Tabla 3-8.	Categorización y normalización del indicador de erosividad	51
Tabla 3-9.	Grupos hidrológicos del suelo	51
Tabla 3-10.	Rangos para la clasificación de las condiciones.....	52
Tabla 3-11.	Número de curva de escorrentía para usos selectos de la tierra agrícola suburbana y urbana (condiciones antecedentes de humedad II, $I_a = 0.2S$).....	52
Tabla 3-12.	Categorización y normalización del indicador de escorrentía	53
Tabla 3-13.	Listado de expertos que participaron en la consulta para la asignación de pesos a los parámetros de vulnerabilidad	55
Tabla 3-14.	Matriz grupal de comparación pareada para la asignación de pesos de los parámetros del IIVCD	60
Tabla 3-15.	Razón de consistencia de la matriz grupal de comparación pareada M_{gcp}	60
Tabla 3-16.	Pesos asignados a los parámetros del IIVCD	60
Tabla 3-17.	Categorización del IIVCD.....	61
Tabla 3-18.	Áreas de la vulnerabilidad para el parámetro Declividad	62
Tabla 3-19.	Áreas de la vulnerabilidad para el parámetro Erosividad.....	64
Tabla 3-20.	Reclasificación de los suelos en grupos hidrológicos.....	65
Tabla 3-21.	Reclasificación de las coberturas	71

Tabla 3-22. Áreas vulnerabilidad para el parámetro Escorrentía.....	74
Tabla 3-23. Reclasificación de las coberturas para cada una de las áreas aferentes a los cuerpos de agua de la cuenca del río Guachal	77
Tabla 3-24. Áreas vulnerabilidad para el parámetro Conectividad hidrográfica	81
Tabla 3-25. Resultados del cálculo del factor K para el indicador de erodabilidad	82
Tabla 3-26. Áreas de vulnerabilidad para el parámetro erodabilidad.....	84
Tabla 3-27. Cálculo del ICAUCA cuenca del río Guachal	86
Tabla 3-28. Áreas de vulnerabilidad para el parámetro Calidad del agua	88
Tabla 3-29. Áreas de vulnerabilidad para el IIVCD	91

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 2-1. Esquema del diseño metodológico	25
Figura 2-2. Esquema metodológico para el desarrollo del objetivo específico 1.....	29
Figura 2-3. Modelo conceptual para operacionalización y categorización de la variable vulnerabilidad	30
Figura 2-4. Estructura jerárquica general AHP	32
Figura 2-5. Agregación de juicios en AHP.....	35
Figura 2-6. Metodología para la construcción del IIVCD	36
Figura 2-7. Localización de la cuenca del río Guachal	37
Figura 2-8. Metodología para la aplicación del IIVCD	38
Figura 3-1. Mapa de redes de co-ocurrencia en VosViewer	39
Figura 3-2. Mapa de distribución temporal de palabras clave	40
Figura 3-3. Mapa de calor de palabras clave	40
Figura 3-4. Revisión bibliográfica por país de origen de los documentos revisados.....	41
Figura 3-5. Resultados de la operacionalización de parámetros de vulnerabilidad	46
Figura 3-6. Prioridad de cada parámetro para cada experto consultado	59
Figura 3-7. Cálculo del indicador de declividad para el IIVCD.....	62
Figura 3-8. Indicador de Declividad IIVCD	63
Figura 3-9. Cálculo del indicador de erosividad para el IIVCD	63
Figura 3-10. Indicador de Erosividad IIVCD	64
Figura 3-11. Cálculo del indicador de escorrentía para el IIVCD.....	74
Figura 3-12. Número de curva cuenca del río Guachal	75
Figura 3-13. Indicador de Escorrentía IIVCD	76
Figura 3-14. Cálculo del indicador de conectividad hidrográfica para el IIVCD.....	81
Figura 3-15. Indicador de Conectividad hidrográfica IIVCD.....	82
Figura 3-16. Cálculo del indicador de erodabilidad para el IIVCD	84
Figura 3-17. Indicador de erodabilidad IIVCD	85
Figura 3-18. Cálculo del indicador de calidad del agua IIVCD.....	88
Figura 3-19. Indicador de calidad del agua IIVCD.....	89
Figura 3-20. Elementos cartográficos empleados en la creación de los indicadores de vulnerabilidad	90
Figura 3-21. Resultados del cálculo del IIVCD por parámetro.....	92

Figura 3-22. IIVCD para la cuenca del río Guachal.....	93
--	----

RESUMEN

En este documento se presenta el diseño y los resultados de una metodología para la estimación de la vulnerabilidad de las fuentes hídricas superficiales a la contaminación difusa agrícola. La metodología se basa en el diseño de un índice basado en los parámetros que influyen en la vulnerabilidad, como la calidad del agua, la pendiente del terreno, conectividad hidrográfica, erosividad, escorrentía y erodabilidad.

El diseño de la metodología se realizó a partir de búsqueda de bibliografía para la identificación de las variables determinantes de la vulnerabilidad, la consulta a expertos y análisis de sus resultados mediante el método de análisis jerárquico de procesos (AHP, por sus siglas en inglés) y el uso de herramientas de análisis espacial y sistemas de información geográfica para procesar y espacializar los resultados del índice diseñado.

La metodología diseñada fue denominada Índice Integral de Vulnerabilidad a la Contaminación Difusa (IIVCD) y fue aplicada a un área de estudio del Valle del Cauca, específicamente en la cuenca del río Guachal y se encontró que la vulnerabilidad es media y que las zonas más vulnerables son aquellas cercanas a los cursos de agua superficial y con pendientes más pronunciadas. El IIVCD es útil para identificar las áreas de mayor riesgo de contaminación difusa agrícola y para ayudar en la toma de decisiones en cuanto a la gestión y protección de las fuentes hídricas superficiales.

Palabras clave: Análisis espacial, Análisis multicriterio, Contaminación difusa, Cuerpos de agua superficial, Vulnerabilidad.

1. INTRODUCCIÓN

La contaminación difusa incluye la originada en la agricultura, la deposición de contaminantes atmosféricos y la escorrentía urbana. La contaminación difusa de origen agrícola es un problema especialmente grave para la gestión de la calidad del agua (Ongley *et al.*, 2010) y constituye una presión grave sobre la calidad del agua dulce y con frecuencia es la causa de la degradación ecológica (Reaney *et al.*, 2019).

Los insumos agrícolas se consideran cada vez más como la fuente más importante de contaminación difusa procedente de la agricultura, son responsables de la contaminación de los recursos hídricos superficiales y subterráneos destinados principalmente al consumo humano y al riego. Esta contaminación genera problemas para la gestión del agua en instrumentos técnicos y normativos orientados al control de la contaminación hídrica (Hao *et al.*, 2013). En el contexto nacional, continúa siendo limitada e incipiente la información, metodologías y regulación en el ámbito de las fuentes no puntuales de contaminación.

Este trabajo de profundización propone un método que permite estimar la vulnerabilidad de los cuerpos de agua superficial a la contaminación difusa de origen agrícola, con el fin de proporcionar una herramienta técnica que permita a los administradores de los recursos hídricos conocer las zonas críticas de posible degradación de los cuerpos de agua en función de sus características intrínsecas principalmente y priorizar medidas de intervención para la prevención o mitigación de la contaminación hídrica en los cuerpos de agua superficial.

El Índice Integral de Vulnerabilidad a la Contaminación Difusa de Origen Agrícola (IIVCD) fue diseñado con base en la combinación de dos herramientas metodológicas; la jerarquización analítica de proceso (AHP) y el análisis espacial a través de los Sistemas de Información Geográfica (SIG). Una vez desarrollado el índice, se realizó su aplicación en la cuenca del río Guachal como caso de estudio, la cual es una cuenca afluente del río Cauca en el departamento del Valle del Cauca. Las herramientas metodológicas utilizadas para la construcción del modelo están basadas principalmente en la revisión bibliográfica, en la consulta a expertos y geoprocetamiento para la selección de los parámetros del índice, su ponderación y posterior cálculo.

De acuerdo con lo anterior, este informe de resultados contiene el marco teórico y conceptual del IIVCD, el diseño metodológico para la construcción del índice, el diseño mismo del índice y los resultados de su aplicación en el caso de estudio. Como resultado final se encontró que la cuenca del río Guachal tiene una vulnerabilidad media, alta y muy alta a la contaminación difusa de los cuerpos de agua superficial. El resultado de este trabajo presenta el diseño y aplicación de una herramienta para la priorización de acciones en zonas vulnerables con el fin de mitigar la contaminación difusa de origen agrícola.

1.1. Objetivos

1.1.1. Objetivo general

Diseñar una metodología basada en análisis multicriterio y análisis espacial para la estimación de la vulnerabilidad de las fuentes hídricas superficiales a la contaminación difusa agrícola.

1.1.2. Objetivos específicos

- Seleccionar los parámetros determinantes de la vulnerabilidad de las fuentes hídricas a la contaminación de origen agrícola.
- Construir un método para la estimación de la vulnerabilidad de los cuerpos de agua superficiales a la contaminación difusa de origen agrícola.
- Aplicar el método construido para la estimación de la vulnerabilidad de los cuerpos de agua superficiales a la contaminación difusa de origen agrícola en un caso de estudio.

1.2. Estado del arte

En el contexto internacional, se ha estudiado la vulnerabilidad aplicada al tema de impactos y riesgos del cambio climático (Adger, 2006; Stathatou *et al.*, 2016) quienes realizaron un estudio para determinar la vulnerabilidad de los sistemas hídricos ante -condiciones relacionadas e identificar posibles estrategias de adaptación, este estudio se realizó en cuatro cuencas fluviales ubicadas en diferentes países de América Latina; México, Brasil, Chile y Argentina. En general, las cuatro regiones son vulnerables a condiciones adversas relacionadas con el agua, en menor medida (cuenca baja/río principal en México) o en mayor medida (cuenca alta) del río Tieté —RPMS) y esto requiere la implementación de medidas de respuesta a la vulnerabilidad.

En el estudio realizado por (Shi *et al.*, (2017), se utilizó un modelo funcional para cuantificar la vulnerabilidad de la cuenca del río Haihe en función de la sensibilidad del agua, la capacidad de adaptación, la exposición y el riesgo de sequía del sistema de recursos. La vulnerabilidad de los recursos hídricos superficiales se evaluó en el año de referencia (2000) utilizando modelos funcionales e indicadores y escenarios climáticos futuros. El resultado fue una mayor vulnerabilidad de los recursos hídricos superficiales cuando se consideran los factores de exposición, riesgo de amenazas y calidad del agua. Ambos modelos mostraron la vulnerabilidad de los recursos hídricos en el área de estudio, todas las áreas fueron clasificadas como 'muy', 'alta' o 'extremadamente' vulnerable.

Este estudio utilizó un modelo de análisis espacial que incorpora varios parámetros previamente definidos como la pendiente, el uso del suelo, la densidad de la red de drenaje, la escorrentía y los niveles de salinidad. Estos parámetros fueron seleccionados y posteriormente integrados en un sistema de información geográfica (SIG). Los resultados mostraron que la densidad de la red de drenaje y el uso del suelo son las principales

razones de la vulnerabilidad de la contaminación de las aguas superficiales urbanas. A pesar de la subjetividad asociada con el proceso Analytical Hierarchy Weighting (AHP), el estudio identificó vulnerabilidades y factores de contaminación. De acuerdo con los autores, estos resultados apoyarán la protección de los recursos hídricos superficiales urbanos.

En el estudio realizado por Xiang *et al.*, (2016) propusieron un método novedoso para cuantificar la vulnerabilidad del agua superficial en regiones húmedas basado en un estudio de caso en el sur de China. Los resultados de este estudio mostraron que la mayoría de las áreas de estudio se caracterizan por una alta disponibilidad de agua, alta capacidad de carga y baja susceptibilidad a la contaminación y escasez de agua.

Otro estudio existente en el marco de un enfoque de vulnerabilidad ambiental fue realizado por (Ghiasvand *et al.*, 2021) quien evaluó la vulnerabilidad ambiental del río Karoon e incluyó una clasificación de vulnerabilidad por el método de lógica difusa a través de sistemas de información geográfica. (SIG). Posteriormente, los mapas resultantes se generan convirtiendo el mapa original a formato ráster. Según los resultados obtenidos, la vulnerabilidad ecológica de la cuenca del Karoon es mayoritariamente baja (78,05%). Las áreas vulnerables clasificadas como extremadamente alta, alta, media y baja son 2.09, 8.09, 12.08 y 78.05 respectivamente. Una de las conclusiones de este estudio en el área de la gestión del recurso hídrico es que es imperativo que las autoridades tomen medidas preventivas para evitar el ingreso de focos contaminantes a este río.

De acuerdo con el estudio realizado por Reaney *et al.*, (2019) la estimación de la vulnerabilidad de las fuentes hídricas resulta un insumo útil para priorizar las áreas de intervención. Los autores utilizaron métodos para identificar diferentes áreas críticas para reducir efectivamente la contaminación difusa, según los autores, el problema de la contaminación difusa puede conceptualizarse como un modelo de impacto de fuente movilizado (o transferido) con alto riesgo de fuente y poderosas vías interconectadas como zonas de origen. Estas áreas serían la mayor fuente de contaminación y, por lo tanto, los mejores lugares para implementar medidas de mitigación.

Para identificar estas áreas de intervención, los autores evaluaron con encuestas tradicionales respaldadas por tres enfoques diferentes y destacaron sus fortalezas y debilidades. Estos incluyen una aplicación de teléfono inteligente diseñada a medida; un sistema de información geográfica (SIG) de escritorio y un enfoque basado en análisis de terreno, SCIMAP (plataforma de análisis y modelado integrado sensible a cuencas hidrográficas); y el uso de conjuntos de datos de drones de alta resolución espacial como una mejora del modelo SCIMAP. Con base en los hallazgos de este estudio, los autores recomiendan un enfoque basado en la evidencia para gestionar la contaminación difusa a escala espacial de las cuencas hidrográficas, combinando el conocimiento local adquirido con diferentes soluciones de datos del SCIMAP.

Un estudio realizado por Hai y Phin (2019), emplearon un modelo que integra una serie de parámetros predeterminados, como la pendiente, el uso del suelo, la densidad de la red de

drenaje, el nivel de escorrentía y la salinidad. Estos parámetros se priorizan, ponderan y luego se integran en los Sistemas de Información Geográfica (SIG). Los resultados indican que la densidad de la red de drenaje y el uso del suelo son los principales factores de la vulnerabilidad de los recursos hídricos superficiales en las zonas urbanas. A pesar de la subjetividad involucrada en el método AHP, el estudio identificó debilidades, así como factores contaminantes, que, según los autores, apoyarán la protección de los recursos hídricos superficiales urbanos.

Existen diferentes métodos para evaluar el riesgo y la vulnerabilidad de los sistemas hídricos, entre ellos SVSS, USGS, AVE y DIOS. Además, existen varios métodos de evaluación de riesgos de aguas superficiales, incluido el PROYECTO ECOMAN, realizado por el Departamento de Servicios de Atención Médica de California, USGS y el Método WRASTIC.

El índice WRASTIC es uno de los métodos de evaluación de riesgos más utilizados y uno de los métodos más avanzados para evaluar el potencial de contaminación de una cuenca en función de sus características y usos del suelo. Este método se utiliza para evaluar la sensibilidad general del sistema en estudio a la posibilidad de contaminación (Maleki *et al.*, 2020). Estos autores realizaron una evaluación del riesgo de contaminación en la Bahía de Gorgan, ubicada en Irán utilizando el índice WRASTIC.

Según los autores del estudio, el modelo WRASTIC es uno de los métodos más prácticos para evaluar el riesgo y un método avanzado para evaluar el potencial de contaminación en una cuenca. Para evaluar los riesgos de contaminación en la cuenca de Gorgan Bay, se estudiaron seis subcuencas del área de estudio utilizando mapas de elevación en QGIS y TerrSet. Los riesgos se identificaron a través de visitas de campo, revisión de la literatura y consultas con expertos y organizaciones relevantes. Finalmente, el índice WRASTIC se presentó como siete capas de información y el número de índice para cada subcuenca se calculó ponderando, ordenando y fusionando dichas capas. Los resultados de este estudio mostraron que tres subcuencas se encuentran en alto riesgo y tres más, en riesgo moderado. Según el nivel de riesgo, la cuenca se encuentra contaminada y vulnerable debido principalmente a las actividades humanas, entre ellas una gran cantidad de aguas residuales vertidas, diversas actividades agrícolas y recreativas. Los autores concluyeron que se debe implementar el monitoreo y control de las actividades humanas en la cuenca para mejorar la condición ecológica de los recursos hídricos en el área de estudio.

Otro de los estudios encontrados, enfocados en la evaluación del riesgo de contaminación fue el realizado por (Zeľeňáková *et al.*, 2021), quienes realizaron la evaluación de riesgos ambientales enfocada en la calidad del agua en la cuenca del río Laborec, ubicada en Irán. Esta investigación se centró en definir las relaciones entre las actividades humanas, las presiones y sus efectos negativos, a partir de los conocimientos recopilados previamente sobre la situación y estado de la calidad del agua en la cuenca de estudio y las fuentes de contaminación. El perfil de exposición, que se desarrolló en el curso de este estudio, es el resultado de un análisis de riesgos ambientales en la cuenca y se centra en la evaluación

de la calidad del agua superficial. Sobre la base de los resultados obtenidos, se determinó que los riesgos son aceptables en la cuenca alta; riesgos moderados en la cuenca media y riesgos inaceptables en la cuenca baja. Esto ocurrió principalmente por la influencia de las actividades industriales. Según los autores, estos resultados permitieron identificar áreas prioritarias para la implementación de medidas para reducir la contaminación del agua.

En el estudio publicado por Kaur *et al.*, (2021), se realizó una evaluación de la calidad del agua en una sección del río Yamuna, que atraviesa el distrito de Panipat, Haryana, India. Este estudio es un estudio aproximado del impacto de las aguas residuales de las actividades urbanas e industriales que ocurren en la ciudad de Panipat y áreas aledañas al río Yamuna. El área vulnerable del río Yamuna se determinó mediante CCME-WQI, NSF-WQI y análisis de conglomerados jerárquicos (HCA). Las muestras de calidad del agua también se evaluaron con fines agrícolas e industriales para determinar si el agua se puede utilizar para riego e industria. El estudio también analizó la cobertura de uso de la tierra (LULC) en las orillas izquierda y derecha del río Yamuna y el sistema de drenaje de aguas residuales. Una de las principales conclusiones del estudio es que alrededor del 31,8% de la parte estudiada del río Yamuna, en el distrito de Panipat, es la más vulnerable a la contaminación debido a las actividades industriales y urbanas que se desarrollan en la ciudad de Panipat.

El estudio realizado por Fernandes *et al.*, (2021) propusieron una nueva metodología, que consiste en la combinación SIG-MCDA, para priorizar las cuencas hidrográficas que requieren intervenciones ambientales para mejorar la calidad del agua superficial. Una de las cuencas de Portugal, la cuenca del Ave, fue seleccionada para probar este método debido a la mala calidad del agua. Primero, el riesgo de contaminación para cada cuenca se calculó con base en el SIG-MCDA utilizando como criterios las presiones de las fuentes puntuales, los datos del paisaje y las emisiones difusas. Este análisis se comparó con los datos de las condiciones químicas y ambientales locales mediante ANOVA y la prueba de Tukey. Los resultados muestran la efectividad de este método cuando el riesgo de contaminación es menor para cuencas en buen estado y mayor para cuencas con menor calificación. Además, calcularon la complejidad de la intervención utilizando un sistema SIG-MCDA diferente. Para este enfoque, se seleccionaron cinco criterios que afectaron las intervenciones ambientales, la densidad de población, la pendiente, el porcentaje de área quemada, el orden de los cuerpos de agua según Strahler y el número de puntos de descarga de efluentes. Ambos métodos multicriterio se combinan en un análisis gráfico para clasificar la prioridad de la intervención por cuencas, dividiendo la prioridad en cuatro categorías del 1 al 4, con mayor prioridad dada a las cuencas hidrográficas que tienen un alto riesgo de contaminación y un bajo nivel de complejidad por intervenciones.

Como resultado, las cuencas con buen estado ambiental se clasificaron principalmente como de baja prioridad de intervención y las cuencas con un estado ecológico más bajo se clasificaron como de alta prioridad. En total, se clasificaron 48 cuencas, lo cual es fundamental para los planificadores que desean proteger la calidad del agua de la cuenca.

De estudios previamente descritos no se ha encontrado un ejercicio de estimación de la vulnerabilidad cuyo enfoque principal esté relacionado con la contaminación difusa agrícola. Específicamente en contaminación difusa las investigaciones encontradas están orientadas a establecer la línea base de la investigación en contaminación difusa especialmente en China (Hao *et al.*, 2013; Ongley, 2004); a caracterizar la contaminación difusa con el fin de garantizar la calidad del agua para consumo humano (Zhang y Huang, 2009); a la evaluación de las fuentes no puntuales de determinados contaminantes como coliformes fecales (Bachoon *et al.*, 2010), pesticidas (Ouyang *et al.*, 2016) y sedimentos (Ouyang *et al.*, 2019; Zhang *et al.*, 2022); a la evaluación de técnicas para el control de las fuentes puntuales de contaminación como los humedales construidos (Wu *et al.*, 2010); al estudio del efecto de las fuentes no puntuales de contaminación en los cuerpos de agua (Lai *et al.*, 2011; Li *et al.*, 2011); a la evaluación del riesgo de contaminación difusa (Cui *et al.*, 2020; Yuan & Jun, 2021); y a establecer lineamientos para la cuantificación y monitoreo de la contaminación difusa (Albek *et al.*, 2019); y al establecimiento de distintos métodos para la evaluación de la contaminación difusa del agua superficial: métodos estadísticos (Wang *et al.*, 2016) y métodos basados en el uso de sistemas de información geográfica (Macary *et al.*, 2014).

En Colombia, las investigaciones relacionadas con la contaminación difusa se han centrado en el análisis de la presencia de pesticidas en los productos agrícolas y los alimentos como la miel (Rodríguez *et al.*, 2014), el tomate (Arias *et al.*, 2014), banano (Wilson & Otsuki, 2014) e incluso la leche materna (Rojas-Squella *et al.*, 2013). Adicionalmente se han hecho estudios sobre la incidencia de la aspersión aérea de pesticidas como el glifosato en cultivos de uso ilícito (Camacho & Mejía, 2017; Benner, Mena & Schneider, 2016).

Es posible afirmar que las investigaciones que relacionan la vulnerabilidad de las fuentes hídricas superficiales a la contaminación difusa agrícola son escasas tanto en el contexto internacional como nacional. Sin embargo, en el contexto internacional, (Grimene *et al.*, 2022.), realizaron la caracterización espacial de la vulnerabilidad del agua superficial a la contaminación difusa relacionada con pesticidas en la cuenca del río Gimone ubicada al suroeste de Francia. En este estudio los autores desarrollaron un método para caracterizar la vulnerabilidad de las aguas superficiales a la contaminación fitosanitaria mediante la implementación de una metodología interdisciplinar que combina la geomática, las ciencias ambientales y la agronomía.

Este trabajo proporcionó a las organizaciones locales una herramienta de toma de decisiones para la gestión participativa de la contaminación difusa. Este estudio se basa en la contribución geográfica del análisis espacial a la determinación a gran escala y alta resolución de los elementos físicos del medio ambiente. También fue basado en el estudio de indicadores agroambientales para analizar presiones fitosanitarias en cuerpos de agua. La combinación de estas diferentes fuentes de datos permitió evaluar la vulnerabilidad a la contaminación difusa a nivel regional, teniendo en cuenta los factores de presión agrícola a nivel de parcela (tipos de cultivo, etc., prácticas agrícolas y fitosanitarias), así como las sensibilidades ambientales a nivel de cuenca (geometría, pluviometría, topografía, etc.).

Los resultados obtenidos fueron presentados a nivel de parcela y a escala de la cuenca de drenaje de Gimone ubicada en el suroeste de Francia.

En el contexto nacional, Echeverri-Sánchez *et al.*, (2020) propusieron una metodología, basada en análisis multicriterio, para identificar la vulnerabilidad de las fuentes hídricas superficiales de las cuencas tributarias al Río Cauca en jurisdicción del Departamento del Valle. Este modelo fue aplicado a la cuenca del Río Cerrito, la cual presenta diversidad de coberturas, pendientes mayores al 12% en su parte alta y agricultura tecnificada en su parte baja. El modelo fue aplicado a partir de sistemas de información geográfica (SIG). El resultado obtenido fue una superficie ráster con valores del Índice de Vulnerabilidad de las fuentes hídricas superficiales a la Contaminación Difusa de origen agroquímico (IVCDA) Uno de los principales hallazgos de este trabajo es que la mayor parte de la cuenca (75,3%) presenta vulnerabilidad media y está asociada principalmente a cultivos de caña de azúcar en zona plana y a pasturas en zona de ladera. Los pequeños focos con vulnerabilidad alta representaron el (0,6%) y estaban asociadas a cultivos como hortalizas, cítricos y vid. Finalmente, las zonas boscosas y herbazales fueron calificadas con vulnerabilidad baja a muy baja.

Los parámetros considerados para la estimación de la vulnerabilidad fueron; la cobertura y uso del suelo, eficiencia de aplicación de fertilizantes, eficiencia de aplicación de pesticidas, la precipitación, distancia de los cultivos a los cuerpos hídricos, fraccionamiento de aplicación de agroquímicos, eficiencia de aplicación del agua de riego, pendiente del terreno, grado de erosión y textura del suelo. Estos parámetros se encuentran en su mayoría relacionados con el componente de exposición de la vulnerabilidad, sin embargo, los parámetros o propiedades intrínsecas del sistema hídrico, asociadas al componente de fragilidad o sensibilidad de la vulnerabilidad, no fueron considerados para la estimación de la vulnerabilidad en este estudio.

1.3. Marco teórico

1.3.1. Gestión integrada de recursos hídricos

Según Naciones Unidas, para 2050, la crisis del agua afectará a las tres cuartas partes de la población mundial. Los principales problemas que plantea esta crisis son la producción insuficiente de alimentos y la degradación de los ecosistemas que sustentan la vida, ya que la producción de alimentos debe aumentar en un 60% para otros 2.000 millones de personas en la Tierra a finales de 2030.(Restrepo, 2004). Diversos autores han descrito la crisis del agua como una crisis de gobernanza (Agyenim & Gupta, 2012). En este sentido, se ha impulsado la implementación de la Gestión Integrada de Recursos Hídricos como estrategia para enfrentar la crisis del agua (Restrepo, 2004).

La definición de Gestión Integrada de Recursos Hídricos que ha tenido mayor popularidad y aceptación es la aportada por Global Water Partnership (GWP), quien se enfoca en las dos bases conceptuales establecidas en la conferencia de Dublín para la GIRH; la integración

y la sostenibilidad (Bandaragoda & Babel, 2010). De acuerdo con la GWP (2000), la GIRH es un proceso que promueve el desarrollo y manejo coordinados del agua, la tierra y otros recursos relacionados, con el fin de maximizar el bienestar económico y social resultante de manera equitativa, sin comprometer la sostenibilidad de los ecosistemas vitales, es un proceso de cambio que busca transformar los sistemas insostenibles de desarrollo y gestión de los recursos hídricos. La GIRH tiene un enfoque intersectorial, diseñado para reemplazar el enfoque tradicional y fragmentado de la gestión del agua, que ha derivado en servicios pobres y un uso inadecuado.

El concepto de GIRH recibió una atención considerable en la Conferencia Internacional sobre el Agua y el Medio Ambiente de 1992 en Dublín (Khan, 2014). La conferencia fue organizada como un evento preparatorio para la Conferencia de las Naciones Unidas sobre el Medio Ambiente y el Desarrollo, que posteriormente se llevó a cabo en Río de Janeiro. La conferencia estableció cuatro principios relacionados con la gestión del agua (1) el agua es un bien finito y vulnerable, (2) el enfoque participativo es esencial, (3) el rol de la mujer es importante y (4) el agua debe ser manejada como un bien económico. Este último principio se convirtió en un tema polémico en la conferencia, especialmente entre los representantes de los países en desarrollo.

El concepto de GIRH ha sido reconocido por expertos en agua y ha sido ampliamente implementado por gobiernos de todo el mundo para el desarrollo sostenible y la gestión del agua (Bandaragoda & Babel, 2010). Agyenim & Gupta (2012) recopilaron varias interpretaciones del principio de complementariedad en la GIRH evaluando a diferentes autores, y en este sentido encontraron las siguientes definiciones para cada interpretación del concepto de integración en el marco de la GIRH:

- Integración sectorial: Integración diversos usos del agua (doméstico, agrícola, industrial, recreativo) y áreas de uso del agua (industria, minería, etc.). Esta integración significa coordinación de planes, software y herramientas de la industria.
- Integración del manejo de los recursos hídricos en un concepto de desarrollo más amplio: Integrar la gestión de los recursos hídricos con la planificación económica y de desarrollo de los países.
- El agua como un componente integral de los ecosistemas: Integración teniendo en cuenta los ecosistemas acuáticos (animales y plantas), suelo, medio ambiente, desarrollo de infraestructura y base de recursos biofísicos.
- Integración espacial: La integración de los flujos aguas arriba y aguas abajo constituye la cuenca como una entidad completa.
- Integración de acciones y objetivos: Integrar las acciones y objetivos que las distintas partes estimen oportunos para conseguir la máxima eficacia.
- Cooperación política, técnica y legal: Integración (nacional, regional y local) y desarrollo de políticas y marcos regulatorios de gestión integrada de recursos hídricos para identificar posibilidades de acoplamiento regulatorio y financiero.

Sin embargo, este enfoque integrado ha hecho que algunos críticos argumenten que, aunque muchos gobiernos de países desarrollados adoptan la GIRH, las políticas de GIRH son difíciles de implementar, especialmente en los países en desarrollo. (Candido *et al.*, 2022). Muchas críticas al diseño e implementación de políticas y programas de GIRH no se relacionan con la falta de soluciones técnicas, sino con la regulación institucional inestable y leyes y reglamentos inapropiados. Sin embargo, a pesar de los desafíos de implementar la GIRH, sigue siendo una herramienta importante para conceptualizar, planificar y gestionar los problemas de la GIRH, en un contexto más amplio, con las partes interesadas. La Gestión Integrada de los Recursos Hídricos no resolverá todos los problemas hídricos que existen en todos los lugares, pero es un proceso coordinado que debe llevarse a cabo paso a paso para un desarrollo adecuado al contexto (Khan, 2014).

1.3.2. Contaminación difusa de origen agrícola

La contaminación difusa o de fuentes no puntuales (NPS, por sus siglas en inglés) es uno de los factores importantes que afectan la calidad del agua de los ríos directamente. También provoca la eutrofización de lagos y embalses. La contaminación por NPS es la contaminación del agua que afecta un cuerpo de agua de fuentes difusas, como la escorrentía contaminada de áreas agrícolas que drenan hacia un río (Lai *et al.*, 2011).

La contaminación difusa se define en algunos estudios como "fuentes multipunto" desconocidas, como la contaminación de las aguas subterráneas. Este tipo de contaminación difusa, provocada por una serie de pequeñas fuentes desconocidas (*multiple point source*), supone una amenaza muy grave para la calidad del agua como consecuencia de sucesivas actividades antrópicas. Esto hace que muy a menudo sea un desafío determinar si las condiciones del agua observadas son el resultado de fuentes contaminantes localizadas, mientras que la contaminación difusa vinculada a la actividad agrícola se define como "fuentes no puntuales". La contaminación difusa puede provenir de diferentes actividades, como la fertilización de tierras agrícolas y el uso de pesticidas, lo que dificulta su gestión. Las pérdidas de nutrientes y moléculas de tierras agrícolas, pastizales y bosques son las que más contribuyen a la contaminación difusa del agua (Grimene *et al.*, 2022).

La contaminación del agua ha tenido muchos efectos negativos, no solo degrada la calidad del agua, amenaza la salud humana y destruye los ecosistemas, sino que también provoca enormes pérdidas económicas. Para resolver el problema cada vez más grave de la contaminación del agua, es necesario identificar los riesgos de contaminación del agua y desarrollar medidas efectivas para controlar los riesgos. Entre los diferentes tipos de contaminación del agua, la contaminación de fuentes no puntuales (NPS) o la contaminación difusa es la más difícil de controlar y prevenir de manera efectiva porque se desconoce su impacto y complejidad (Yuan & Jun, 2021).

La contaminación de fuentes difusas en la agricultura, se refiere a una contaminación que se produce en el agua cuando algunas sustancias orgánicas o inorgánicas venenosas y

peligrosas, como partículas de sedimentos, nitrógeno y fósforo, en el momento de la producción agrícola (incluida la agricultura y la cría de aves de corral) y la vida rural normal, van apareciendo lentamente en la superficie agua y en las aguas subterráneas a través de escorrentía superficial, drenaje de tierras de cultivo y aguas subterráneas (Hao *et al.*, 2013).

La precipitación es el proceso natural que explica la contaminación desde una fuente no puntual en la agricultura. Factores como la superficie subyacente, especialmente la influencia del suelo, la forma del terreno y el factor de cobertura vegetal, las actividades agrícolas, la producción y la vida rural de las personas, son los factores que inciden en la generación de contaminación difusa de origen agrícola (Hao *et al.*, 2013). El proceso de génesis y desarrollo de la contaminación de fuentes difusas en la agricultura incluye fuentes contaminantes, procesos de contaminación y las consecuencias de esa de contaminación. Las fuentes contaminantes, consisten en fertilizantes, plaguicidas, ganadería y avicultura, sólidos agrícolas y asentamientos húmedos atmosféricos, junto con aguas residuales en la vida rural, basura doméstica y excrementos humanos (Lai *et al.*, 2011)

Las consecuencias de la contaminación de una fuente difusa en la agricultura incluyen: (i) contaminantes, tanto en partículas como disueltos, que se filtran en los cuerpos de agua con la escorrentía y la erosión del suelo, lo que lleva a la contaminación. (ii) Los contaminantes, en su forma disuelta, ingresan al agua subterránea. El estado de lixiviación en el área de cultivo debido al riego prolongado que conduce a un fuerte aumento en el nivel freático, lo que conduce a la contaminación de las aguas subterráneas de una fuente no especificada (Lai *et al.*, 2011).

En la mayoría de los casos de gestión de cuencas, la contaminación de fuentes puntuales se ha controlado y gestionado con éxito; Sin embargo, en algunos casos, el deterioro de la calidad sigue siendo motivo de preocupación debido a las frecuentes descargas de contaminantes no específicos (NPS) en los cuerpos de agua. La contaminación de NPS no se origina en un punto específico en el espacio; estas cargas espacialmente dispersas son transportadas por la escorrentía superficial y subterránea de la lluvia y por los flujos de retorno del sistema de riego. La contaminación por fuentes difusas es más común y difícil de identificar, aislar y controlar que la contaminación por fuentes puntuales. (Lai *et al.*, 2011).

La contaminación por NPS, como sólidos suspendidos (SS), nutrientes, pesticidas, fertilizantes y otras fuentes inorgánicas y orgánicas contribuyen a la carga de grandes cantidades de contaminantes en los cuerpos de agua y al deterioro de la calidad del agua. Además, los investigadores han demostrado que factores como las propiedades del suelo, la topografía y la intensidad de las lluvias influirán en la cantidad y calidad de la contaminación por NPS (Lai *et al.*, 2011).

1.3.3. Modelos de análisis multicriterio

En el proceso de toma de decisiones, es necesario utilizar métodos cuantitativos junto con métodos cualitativos. La teoría de decisión multicriterio es una herramienta que debe incluirse en este proceso porque permite examinar un conjunto de objetivos a menudo en conflicto, encontrar compromisos o equilibrios entre ellos, o implementar un conjunto de objetivos relacionados con los objetivos de decisión establecidos. (Rodríguez-Cotilla, 2000). Los sistemas de apoyo a la decisión (DSS, por sus siglas en inglés), basados en la toma de decisiones multicriterio (MCDM) representan la combinación de diferentes criterios o métodos establecidos para la optimización del comportamiento de un sistema con diferentes objetivos previamente establecidos (Mannina *et al.*, 2019). Según Rodríguez-Cotilla (2000) en la teoría de la decisión multicriterio se consideran los siguientes conceptos:

- Atributos: son los valores del centro decisor que se corresponden con la realidad y son medidos con independencia de sus deseos.
- Objetivos: son las direcciones de mejora de los atributos. Hay solo dos direcciones máximo ("más del atributo mejor"; proceso de maximización) y mínimo ("menos del atributo mejor"; proceso de minimización).
- Nivel de aspiración: es el nivel aceptable de logro para un atributo.
- Metas: se generan al combinar un atributo con el nivel de aspiración correspondiente. Las metas se representan como desigualdades.
- Criterios: son los atributos, objetivos o metas que se consideran relevantes en el problema decisional.

El método más apropiado para combinar factores con características técnicas, económicas y ambientales es un análisis de decisión multicriterio (MCDA). Se han desarrollado varios enfoques de criterios múltiples, como ELECTER, TOPSIS, MAUT, PROMTHEE y AHP, para diversas aplicaciones, como la evaluación de proveedores ambientales, la selección del sitio y la estructura de los desechos, y la evaluación de las opiniones de las partes interesadas sobre el impacto ambiental de la eliminación de residuos sólidos, elegir un sitio o material para residuos sólidos industriales, elegir una solución de tratamiento de residuos sólidos y aguas residuales, o seleccionar la mejor opción de gestión de residuos (Gdoura *et al.*, 2015).

Los enfoques multicriterio difieren en cómo se considera el concepto de "multicriterio", en términos de aplicabilidad y cálculo del peso del criterio, al algoritmo matemático utilizado, y un modelo para describir sistemáticamente las prioridades de cada individuo para la decisión, a la incertidumbre inherente a los datos y al potencial de participación de las partes interesadas en el proceso de toma de decisiones (Okeola & Sule, 2011).

En particular, AHP es un método estructurado para organizar y analizar decisiones complejas, basado en matemáticas y psicología. En 2011, Saaty y Shang presentaron un marco basado en AHP con el objetivo de reconocer la relación entre los diferentes niveles de actividad que las personas aportan a la sociedad. AHP se ha aplicado a una variedad

de situaciones para satisfacer la necesidad de priorizar alternativas objetivas y heterogéneas para estructurar decisiones complejas. El uso de AHP permite a los usuarios superar la complejidad de resolver problemas científicos en términos de escala y generalizar criterios y alternativas en una decisión compleja. Dado que muchos elementos suelen ser heterogéneos, es importante organizarlos en varios grupos homogéneos, luego tratar las relaciones entre estos grupos como parte del proceso de interconexión y luego determinar su prioridad para la medición (Oborenko *et al.*, 2020).

AHP es el método de síntesis más poderoso disponible para combinar el juicio y los datos para clasificar las opciones y predecir los resultados de manera efectiva. Las decisiones dependen de circunstancias y condiciones futuras que cambian con el tiempo. El método AHP utiliza principios de análisis, evaluación comparativa y síntesis. El análisis implica construir una jerarquía que anteponga el objetivo del problema y coloque los criterios, subcriterios y alternativas en una jerarquía descendente. Para realizar juicios comparativos se organiza una matriz de comparación en cada nivel para comparar pares de (sub)criterios o pares de alternativas. Se ensamblan matrices de comparación por pares completas para estimar la prioridad relativa de todas las alternativas consideradas. Finalmente, el AHP proporciona una calificación absoluta y un valor relativo para cada alternativa (Oborenko *et al.*, 2020).

1.3.4. Análisis espacial y sistemas de información geográfica (SIG)

El estudio cuantitativo de los fenómenos que ocurren en el espacio es denominado análisis espacial. Esto demuestra la importancia fundamental de la ubicación, la superficie, la distancia y la interacción en el espacio mismo. Para que estos conceptos tengan sentido, toda la información debe estar referenciada espacialmente. Desde un punto de vista menos formal, el análisis espacial puede entenderse como el conjunto de operaciones que se realizan sobre las bases de datos espaciales en el trabajo rutinario con las mismas. De hecho, casi todas las operaciones sobre datos espaciales constituyen alguna forma de análisis. Aunque la llegada de los SIG ha dado lugar a interesantes desarrollos en este campo, el análisis espacial no es algo novedoso (Olaya, 2014).

El análisis espacial se centra en el estudio de manera independiente de los componentes de un espacio, identificando sus componentes constituyentes y cómo se comportan bajo ciertas condiciones. Para ello, el análisis espacial utiliza un conjunto de herramientas técnicas que pueden responder sólo a una parte de la dinámica del espacio, pero no a su totalidad (Madrid & Ortiz, 2005).

Este proceso puede ser definido como un punto en el proceso de investigación donde se incorpora una variedad de técnicas que buscan separar, procesar y categorizar datos para ayudar a encontrar respuestas a un problema más amplio. Implica una exploración de las peculiaridades de un fenómeno para determinar su participación en el todo. Elegir las herramientas que serán utilizadas por el investigador, luego encontrar las relaciones adecuadas en sus resultados para llegar a una visión integral (Madrid & Ortiz, 2005).

Los sistemas de información geográfica (SIG) y el análisis espacial no son sinónimos, a pesar de que un gran número de fuentes bibliográficas los vinculan estrechamente. La importancia de SIG radica en la facilidad que le da al investigador para procesar información espacial y representar esa información a través del modelo de realidad análoga, presentando entidades espaciales de diferentes áreas de puntos, líneas, polígonos e información temática. (Madrid & Ortiz, 2005).

El análisis espacial es esencial en la gestión de cuencas hidrográficas para el desarrollo sostenible de los recursos hídricos. Los sistemas de información geográfica (GIS) brindan funciones poderosas para almacenar, recuperar, analizar y visualizar datos espaciales. Por lo tanto, SIG se ha utilizado para desarrollar un DSS para encontrar formas útiles de resolver problemas de cuencas hidrográficas. En resumen, SIG es esencialmente una herramienta que se puede utilizar para almacenar, administrar, analizar y visualizar datos espaciales (Asgari, 2021; Muradyan & Asmaryan, 2015).

Los SIG se puede definir como un conjunto de hardware, software y procedimientos diseñados para respaldar la recopilación, el almacenamiento, la recuperación, el análisis y la visualización de datos espacialmente referenciados para resolver problemas de planificación y gestión. Además de estos componentes técnicos, un sistema integral de información de gestión también debe incluir un enfoque en las personas, las organizaciones y las normas (Harvey, 2008.)

1.3.5. Concepto de amenaza

La amenaza o peligro es un proceso, fenómeno o actividad humana que puede causar la muerte, lesiones, daños de la salud, conmoción, daño a la propiedad, degradación económica, social o ambiental. Los peligros pueden ser de origen natural, humano o socio-natural. Los peligros naturales están principalmente relacionados con procesos y fenómenos naturales. Los peligros pueden ser únicos, secuenciales o agregados en origen y efecto. Cada amenaza se caracteriza por su ubicación, intensidad, magnitud, frecuencia y probabilidad de ocurrencia (de Angeli *et al.*, 2022).

Se entiende como amenaza o peligro a la probabilidad de que ocurra un evento catastrófico dentro de un cierto período de tiempo en un lugar en particular. En general, la amenaza se refiere a un peligro potencial o factor de riesgo externo a un sistema o sujeto expuesto, que se puede expresar matemáticamente como la mayor probabilidad de que ocurra un evento de una magnitud dada, durante un período de tiempo determinado. Una ubicación específica y para un período de exhibición específico (Chávez López, 2018; Cardona, 2001.)

La amenaza puede entenderse como un riesgo potencial de que un evento físico de origen natural, involuntariamente causado por humanos o causado por humanos, ocurra con tal gravedad que cause la muerte, lesión o muerte, daño a la propiedad, infraestructura, medios de vida, provisión de servicios y recursos ambientales (UNGRD, 2013). Las amenazas

también pueden entenderse como fuentes de inseguridad provenientes de una fuente externa, producto de una acción deliberada (Briones, 2015) o como la potencialidad de un fenómeno dañino, en este caso, corresponde a actividades humanas y naturales que contaminan el medio ambiente (Bautista *et al.*, 2011).

1.3.6. Concepto de vulnerabilidad

El concepto de vulnerabilidad es usado en diversas disciplinas (Joakim *et al.*, 2015; Scholz *et al.*, 2012), desde la medicina (a través de la salud pública y la psicología), hasta la economía y las finanzas, y desde las ciencias ambientales, hasta los sistemas técnicos, como los sistemas de tecnología de la información (Scholz *et al.*, 2012). La vulnerabilidad se refiere a la posibilidad de pérdida en el sentido más amplio. Sin embargo, el término ha sido definido y tratado de muchas formas y a menudo contradictorias. Se han identificado tres enfoques destacados fueron identificados por Chang & Falit-Baiamonte (2002); han identificado tres enfoques importantes; El primer concepto describe la vulnerabilidad como un riesgo potencial a los peligros biofísicos y, desde una perspectiva espacial, enfatiza la proximidad a la fuente de riesgo como un factor determinante de la vulnerabilidad. El segundo enfoque considera la vulnerabilidad como la capacidad de los individuos o las sociedades para hacer frente a los riesgos y responder a ellos, centrándose en las posibles fuerzas sociales, políticas y económicas que conducen a la pérdida. Un tercer enfoque busca integrar la vulnerabilidad biofísica y social dentro del contexto de un espacio geográfico o social particular.

De acuerdo con Scholz *et al.*, (2012), el concepto de vulnerabilidad se ha convertido en un concepto importante en el Tercer Informe de Evaluación del Panel Intergubernamental sobre el Cambio Climático (IPCC), donde la vulnerabilidad se define como el nivel de un sistema que es susceptible a los impactos adversos o es incapaz de enfrentarlos. La vulnerabilidad es una función de las características, magnitud, tasa de cambio externo a la que está sujeto un sistema, su sensibilidad y su capacidad de adaptación. Joakim *et al.*, (2015), revisaron conceptos y enfoques para la vulnerabilidad y los resultados de este ejercicio son cuatro enfoques principales de este concepto;

- La vulnerabilidad como umbral: La primera comprensión de la vulnerabilidad explora el concepto como la probabilidad de que una persona, comunidad o sistema alcance o supere un cierto punto de referencia o umbral, que es más común en la literatura de seguridad alimentaria. Este enfoque también se encuentra comúnmente en la ingeniería, donde la vulnerabilidad es el umbral en el que es probable que las estructuras físicas colapsen (p. ej., la falla de un dique y el colapso de un edificio) o se superen las medidas de protección (p. ej., el desbordamiento de las medidas de protección contra inundaciones).
- La vulnerabilidad como exposición a peligros: El segundo enfoque identifica las vulnerabilidades asociadas con la exposición a riesgos o tensiones particulares. Esto surge como el enfoque tradicional de riesgo y peligro, en el que se consideran

eventos puramente físicos, y la población afectada se considera un factor negativo en el proceso. La vulnerabilidad se define específicamente como una consecuencia directa de la exposición y, a menudo, hay poca diferencia entre las características sociales y espaciales de las áreas afectadas. En este enfoque, la atención se centra en los sistemas físicos, como el entorno construido. Además, este enfoque tiende a centrarse en el efecto inmediato de una amenaza o estrés, a diferencia de los problemas que pueden surgir después de la exposición.

- La vulnerabilidad como condición preexistente: Un tercer enfoque describe la vulnerabilidad como un estado o condición del sistema antes de que ocurra una amenaza o estrés relacionado con el clima, a menudo descrito de acuerdo con los siguientes criterios: como vulnerabilidad, limitación, deterioro o defecto, por ejemplo, incapacidad para combatir los efectos de un amenaza o cambio climático (resistencia) y la incapacidad para hacerle frente (*Coping Capacity*).
- La vulnerabilidad como un resultado: Se define como una vulnerabilidad de "punto final". El enfoque de punto final considera la vulnerabilidad como un resultado negativo que queda después de futuros escenarios de cambio e impactos biofísicos al identificar estrategias de adaptación. Por lo que la vulnerabilidad se entiende como el resultado final, o efecto neto, luego de realizar una serie de proyecciones y estimaciones de cambios y adaptaciones en el sistema.

La vulnerabilidad, en el marco del desarrollo de este trabajo de profundización, será la definida por Stathatou *et al.*, (2016) como el nivel en que un sistema es susceptible e incapaz de hacer frente a lesiones, daños o perjuicios. Es una función de la exposición del sistema a las amenazas, su sensibilidad y su capacidad de adaptación. En este sentido, el autor define estos tres conceptos como;

- Exposición: la naturaleza, el grado, la duración y/o la medida en que el sistema está en contacto o sujeto a perturbaciones.
- Sensibilidad: el grado en que un sistema puede ser modificado o afectado (adversa o beneficiosamente, directa o indirectamente) por una perturbación o conjunto de perturbaciones.
- Capacidad adaptativa: la habilidad de un sistema para ajustarse a las perturbaciones, para moderar los daños potenciales, para aprovechar las oportunidades o para hacer frente a las consecuencias de las transformaciones que ocurren.

1.3.7. Riesgo de contaminación

Van Leeuwen y Hermens (1995), citados por Lahr & Kooistra (2010) definen el riesgo como la posibilidad de que se produzca un efecto adverso en los seres humanos o el medio ambiente como resultado de la exposición a una sustancia química o mezcla de sustancias químicas. Asimismo, el riesgo de contaminación se refiere a la posibilidad de que un área en particular se contamine con sustancias potencialmente dañinas; por lo tanto, la contaminación aún no se ha producido o aún se desconoce el alcance y las características de dicha contaminación (Lahr & Kooistra, 2010). En este sentido el riesgo de contaminación hace referencia a una probabilidad, es decir, una contaminación potencial.

Los riesgos surgen de una combinación de características ambientales, de vulnerabilidad de los sistemas hídricos con las diferentes presiones a los que están expuestos (Macary *et al.*, 2014). La vulnerabilidad se refiere a cómo un receptor responde a estas tensiones (Lahr & Kooistra, 2010). La vulnerabilidad ambiental juega un papel importante en la calidad de las aguas superficiales para uso humano y de los ecosistemas. La contaminación observada en las cuencas rurales se debe principalmente a los insumos agrícolas (pesticidas y fertilizantes nitrogenados). Estos factores constituyen el segundo componente del riesgo y se conocen como presiones, amenazas o estresores.

2. DISEÑO METODOLÓGICO

2.1. Esquema metodológico general

En la Figura 2-1 se presenta el esquema metodológico desarrollado en el desarrollo del trabajo de profundización para el logro de cada uno los objetivos propuestos:

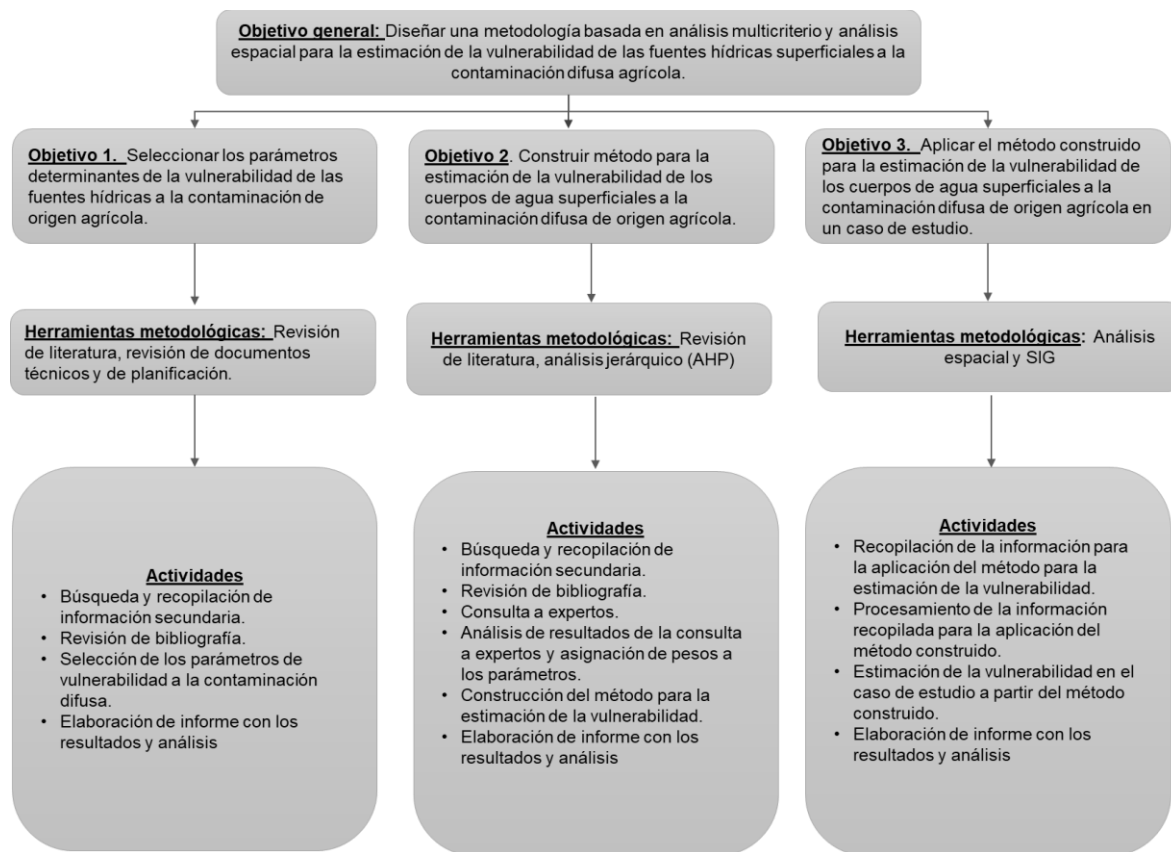


Figura 2-1. Esquema del diseño metodológico

2.2. Selección de los parámetros determinantes de la vulnerabilidad de las fuentes hídricas a la contaminación difusa de origen agrícola

Para la selección de los parámetros determinantes de la vulnerabilidad de las fuentes hídricas superficiales a la contaminación difusa de origen, se realizó un análisis bibliométrico con el fin de conocer el estado del arte y la condición actual de investigación y publicaciones. Para este propósito se utilizó *Scopus* como base de datos de búsqueda y se formularon palabras clave en inglés, relacionadas con la temática de contaminación difusa, vulnerabilidad y fuentes hídricas superficiales. Las palabras clave, las ecuaciones de búsqueda, las áreas temáticas consultadas y el número de documentos encontrados en cada consulta se presentan en la Tabla 2-1.

Tabla 2-1. Palabras clave y ecuaciones de búsqueda para el análisis bibliométrico

N°	Palabras clave	Ecuación de búsqueda	Área temática
1	Surface Water Vulnerability Index to Diffuse Water Pollution	TITLE-ABS-KEY (surface AND water AND vulnerability AND index AND to AND diffuse AND water AND pollution) AND (LIMIT-TO (SUBJAREA , "ENVI") OR LIMIT-TO (SUBJAREA , "EART") OR LIMIT-TO (SUBJAREA , "ENGI"))	Ciencias ambientales, Ciencias de la Tierra, Ingeniería
2	Surface Water Diffuse Pollution	TITLE-ABS-KEY (surface AND water AND diffuse AND pollution) AND (LIMIT-TO (SUBJAREA , "ENVI") OR LIMIT-TO (SUBJAREA , "AGRI") OR LIMIT-TO (SUBJAREA , "EART") OR LIMIT-TO (SUBJAREA , "CHEM") OR LIMIT-TO (SUBJAREA , "ENGI") OR LIMIT-TO (SUBJAREA , "CENG"))	Ciencias ambientales, Ciencias agrícolas y biológicas, Ciencias de la Tierra, Química, Ingeniería, Ingeniería Química
3	Diffuse Pollution Assessment	TITLE-ABS-KEY (diffuse AND pollution AND assessment) AND (LIMIT-TO (SUBJAREA , "ENVI") OR LIMIT-TO (SUBJAREA , "EART") OR LIMIT-TO (SUBJAREA , "AGRI") OR LIMIT-TO (SUBJAREA , "ENGI") OR LIMIT-TO (SUBJAREA , "CHEM"))	Ciencias ambientales, Ciencias agrícolas y biológicas, Ciencias de la Tierra, Ingeniería, Ingeniería Química
4	Surface Water Diffuse Pollution Assessment	TITLE-ABS-KEY (surface AND water AND diffuse AND pollution AND assessment) AND (LIMIT-TO (SUBJAREA , "ENVI") OR LIMIT-TO (SUBJAREA , "AGRI") OR LIMIT-TO (SUBJAREA , "EART") OR LIMIT-TO (SUBJAREA , "ENGI") OR LIMIT-TO (SUBJAREA , "CHEM"))	Ciencias ambientales, Ciencias agrícolas y biológicas, Ciencias de la Tierra, Química, Ingeniería
5	Surface Water Diffuse Pollution Parameter	TITLE-ABS-KEY (surface AND water AND diffuse AND pollution AND parameter) AND (LIMIT-TO (SUBJAREA , "ENVI") OR LIMIT-TO (SUBJAREA , "EART") OR LIMIT-TO (SUBJAREA , "AGRI") OR LIMIT-TO (SUBJAREA , "CHEM") OR LIMIT-TO (SUBJAREA , "ENGI") OR LIMIT-TO (SUBJAREA , "CENG"))	Ciencias ambientales, Ciencias agrícolas y biológicas, Ciencias de la Tierra, Química, Ingeniería
6	Water Diffuse Pollution	TITLE-ABS-KEY (water AND diffuse AND pollution) AND (LIMIT-TO (SUBJAREA , "ENVI") OR LIMIT-TO (SUBJAREA , "AGRI") OR LIMIT-TO (SUBJAREA , "EART") OR LIMIT-TO (SUBJAREA , "ENGI") OR LIMIT-TO (SUBJAREA , "CHEM") OR LIMIT-TO (SUBJAREA , "CENG"))	Ciencias ambientales, Ciencias agrícolas y biológicas, Ciencias de la Tierra, Ingeniería, Química, Ingeniería Química

Índice Integral de Vulnerabilidad a la Contaminación Difusa de Origen Agrícola - IIVCD

Nº	Palabras clave	Ecuación de búsqueda	Área temática
7	Diffuse Pollution Variable	TITLE-ABS-KEY (diffuse AND pollution AND variable) AND (LIMIT-TO (SUBJAREA , "ENVI") OR LIMIT-TO (SUBJAREA , "AGRI") OR LIMIT-TO (SUBJAREA , "EART") OR LIMIT-TO (SUBJAREA , "ENGI") OR LIMIT-TO (SUBJAREA , "CHEM"))	Ciencias ambientales, Ciencias agrícolas y biológicas, Ciencias de la Tierra, Ingeniería, Química
8	Diffuse Pollution Parameter	TITLE-ABS-KEY (diffuse AND pollution AND parameter) AND (LIMIT-TO (SUBJAREA , "ENVI") OR LIMIT-TO (SUBJAREA , "EART") OR LIMIT-TO (SUBJAREA , "AGRI") OR LIMIT-TO (SUBJAREA , "ENGI") OR LIMIT-TO (SUBJAREA , "CHEM"))	Ciencias ambientales, Ciencias agrícolas y biológicas, Ciencias de la Tierra, Ingeniería, Química

Los resultados de la búsqueda para cada palabra o frase clave fueron exportados de *Scopus* y fueron analizados posteriormente en el *software* especializado para análisis bibliométrico *VosViewer*, allí se generaron mapas de redes para analizar la co-ocurrencia de las palabras clave, tanto de autor como palabras clave indexadas. De este análisis se extrajeron los términos con mayor co-ocurrencia como insumo para la identificación preliminar de los parámetros de vulnerabilidad a la contaminación difusa estudiadas más frecuentemente en las publicaciones actuales.

Posteriormente se realizó una selección de los artículos, tanto de revisión como de resultados de investigación, para realizar una revisión completa con el fin de obtener los parámetros a ser considerados en la estimación de la vulnerabilidad. El proceso de selección fue manual considerando la afinidad del título del artículo, las palabras clave y el resumen con la temática de vulnerabilidad a la contaminación difusa en fuentes hídricas superficiales. En total se seleccionaron cincuenta y tres (53) artículos científicos provenientes de distintas bases de datos, como *Science Direct*, *Taylor y Francis*, *Web of Science* y *Springer Link*.

Una vez seleccionados los artículos para la revisión se realizó la lectura completa de estos documentos con el fin de abstraer los parámetros asociados a la vulnerabilidad por contaminación difusa que fueron consideradas en estos estudios o revisiones de literatura. De manera simultánea a la revisión de estos documentos se realizó la construcción de una matriz preliminar de parámetros encontrados como insumo para un proceso posterior de selección y depuración. Finalmente, a partir de la matriz preliminar construida, se calculó el indicador de porcentaje de citación de cada una de las variables encontradas, el cual corresponde a el número de veces que la variable fue encontrada en cada uno de los documentos revisados, con respecto al total de documentos revisados. De este modo, se seleccionaron como variables definitivas aquellas que se encontraron con un porcentaje de citación igual o superior al 30%. En la Figura 2-2 se presenta el esquema metodológico descrito para la consecución del primer objetivo específico de este estudio.

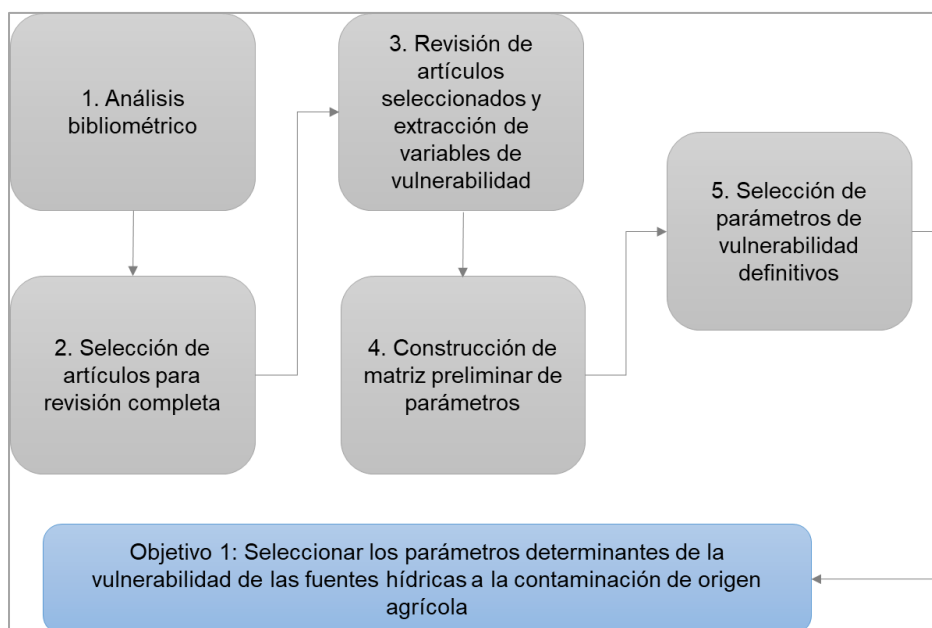


Figura 2-2. Esquema metodológico para el desarrollo del objetivo específico 1

2.3. Construcción de un método para la estimación de la vulnerabilidad de las fuentes hídricas superficiales a la contaminación difusa de origen agrícola

La construcción del método para la estimación de la vulnerabilidad a la contaminación difusa se realizó con base en la metodología propuesta por Cazau (2004), por medio del cual se operacionalizó y categorizó la variable que este caso es la amenaza. Los pasos de la metodología de Cazau están dados en el siguiente orden: i) se definición teórica la variable, ii) definición de los parámetros de caracterización iii) definición de los indicadores, iv) selección de los valores para cada indicador, v) definición de la categoría para el índice en el cual se resume su intensidad, esto permite llevar la variable de tipo teórica y cualitativa a propiedades observables y medibles. El proceso descrito se presenta en la Figura 2-3.

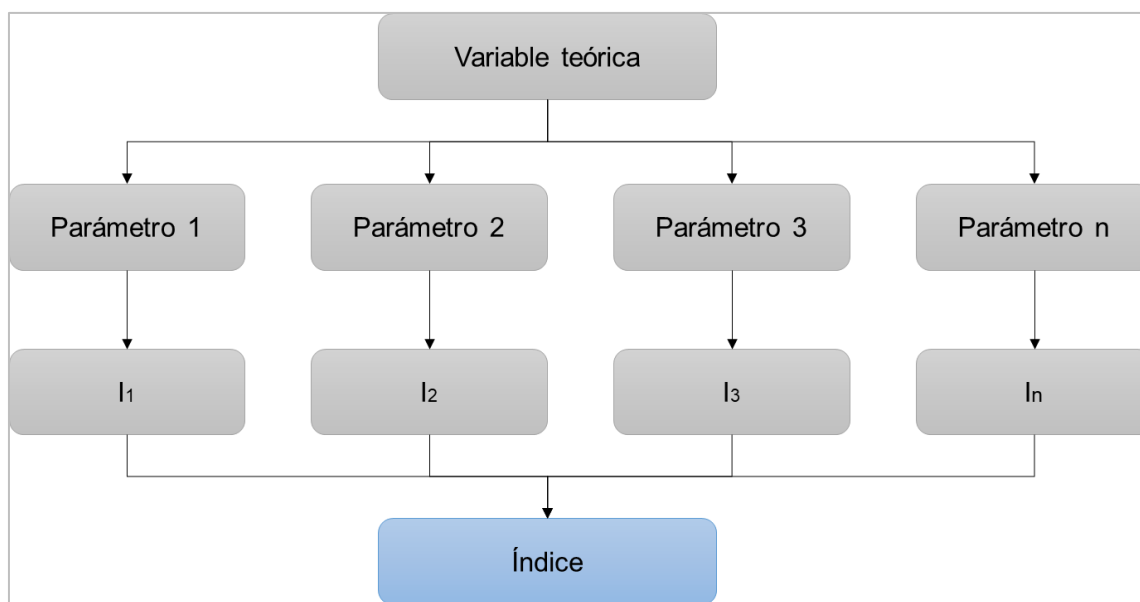


Figura 2-3. Modelo conceptual para operacionalización y categorización de la variable vulnerabilidad

Una vez obtenidos los indicadores de vulnerabilidad para cada parámetro, se seleccionó el método mediante el cual calculó la vulnerabilidad que corresponde a la suma ponderada de los parámetros normalizados. Este método para la estimación de la vulnerabilidad corresponde al utilizado por Hlalele, (2019); Echeverri-Sánchez *et al.*, (2020):

$$IIVCD = \sum_{j=1}^n P_j \times W_j \quad (\text{Ecuación 1})$$

Donde;

IIVCD es el Índice Integral de Vulnerabilidad a la Contaminación Difusa

Pj Valor normalizado del parámetro

Wj Peso o grado de importancia de parámetro

El Índice Integral de Vulnerabilidad a la Contaminación Difusa, como fue denominado, considera los aspectos intrínsecos de la vulnerabilidad. Este índice se compone de dos términos; uno corresponde a los parámetros que fueron seleccionados mediante revisión bibliográfica, y el otro corresponde a los pesos o grados de importancia de cada uno de los parámetros. Para la obtención de estos últimos se realizó una consulta a expertos mediante el método Delphi, el cual consiste en una metodología estructurada para recolectar sistemáticamente juicios de expertos sobre un problema, procesar la información y a través de recursos estadísticos, construir un acuerdo general de grupo (García *et al.*, 2013). Se utilizó el método Delphi debido a sus múltiples ventajas las cuales son:

- Reúne y sintetiza el conocimiento de un grupo de participantes que geográficamente esparcidos o no, nunca podrían reunirse para construir un consenso grupal.
- Los expertos del mundo actual pueden participar por la vía del correo electrónico con la consecuente disminución en los costos.
- Un mayor número de individuos de situaciones diversas y áreas de especialización puede ser incluido.
- Favorece libertad de opiniones.
- Reduce la influencia del líder en la interacción del grupo y evita el dominio en el acuerdo general de lo que considere la minoría o aquellos que supuestamente tienen mayor autoridad.
- La confidencialidad de las respuestas permite a los expertos disentir a la luz de un nuevo análisis, incluso de opiniones sostenidas públicamente durante años, sin tener que enfrentarlo ante sus colegas

La selección de los expertos se realizó considerando el nivel de estudio con posgrado y/o experiencia profesional en el tema de contaminación difusa. Los expertos fueron seleccionados con base en los autores consultados en la revisión bibliográfica tanto nacionales como internacionales y profesionales conocidos en el área de la Universidad del Valle y la Universidad Tecnológica de Pereira, así como la autora, el director del trabajo de profundización y los evaluadores del anteproyecto. Para el caso de los expertos internacionales se verificó que hubiese representación geográfica de mínimo un experto por cada uno de los cinco primeros países de origen de los artículos consultados. De acuerdo con (García *et al.*, 2013), a partir de un mínimo de siete expertos el error disminuye notablemente por cada experto añadido, en este sentido, se consolidó un panel preliminar de 33 expertos debido a que es recomendable iniciar con un número mayor que el deseado pues es de esperar que ocurran deserciones.

La fase de preparación del instrumento consistió en el diseño de un documento síntesis que contiene la presentación del proyecto, el resumen de los parámetros seleccionados mediante revisión bibliográfica, una descripción de la metodología de calificación pareada del método analítico jerárquico (AHP, por sus siglas en inglés) para la comparación de los parámetros y el cuadro para el diligenciamiento de la calificación con el fin de obtener los pesos de los parámetros para cada experto consultado. Debido a que el listado de expertos es tanto nacional como internacional, el instrumento de consulta diseñado se elaboró en idioma español e inglés y se encuentra en el anexo de este informe.

La vía de consulta seleccionada fue el correo electrónico, redactado tanto en inglés como en español donde se adjuntó el instrumento como archivo de Word editable para ser diligenciado y enviado de vuelta por los expertos. Una vez enviada la consulta se recibieron respuestas durante un periodo de 30 días calendario. Una vez enviada la consulta se realizó el seguimiento a las respuestas vía telefónica o correo electrónico con el fin de disminuir la deserción en el proceso. Finalmente, una vez recibidas las respuestas de los expertos, se procedió a realizar el análisis de la información a través del uso del método AHP.

El método AHP es particularmente útil para ponderar propiedades en las que no existe una escala estándar de medida (Nantes, 2019), además, debido a la gran cantidad de juicios emitidos por los expertos consultados, es requerido resolver un problema de criterios múltiples, con múltiples variaciones. En este sentido, AHP es una técnica que se ajusta en gran medida a los requerimientos del problema planteado y que se puede complementar en cinco pasos sistemáticos (Mendoza *et al.*, 2019):

- a) Desarrollo de la estructura jerárquica.
- b) Representación de los juicios de valor.
- c) Construcción de las matrices de juicio de valor y matrices normalizadas.
- d) Cálculo de los vectores de prioridad y consistencia.
- e) Análisis de resultados.

La estructura jerárquica corresponde a una representación gráfica del problema a modo de jerarquía, con el objetivo en la cúspide, las alternativas en el escalón inferior, y los criterios en el nivel (o niveles) intermedios (Figura 2-4).

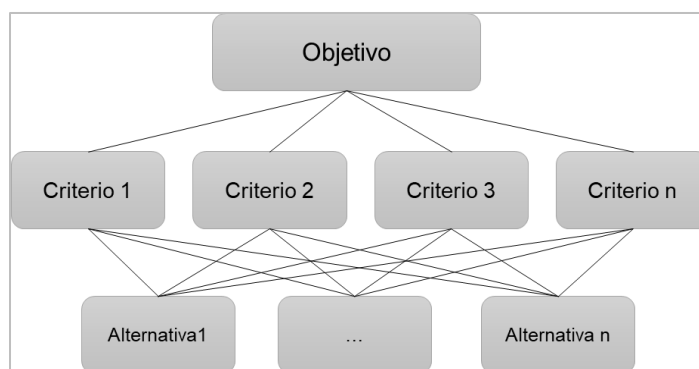


Figura 2-4. Estructura jerárquica general AHP
Fuente: (Mendoza *et al.*, 2019)

Para la representación de los juicios de valor realizados por los expertos, se utilizó una herramienta que permitió considerar los juicios subjetivos, pero al mismo tiempo redujo la incertidumbre por la naturaleza de los juicios personales (Mendoza *et al.*, 2019). Por tal motivo, se seleccionó por la escala de Saaty, presentada en la Tabla 2-2, para definir los valores que pueden tomar los juicios emitidos por los expertos. Esta escala puede considerarse una representación de los juicios de valor para la comparación entre dos alternativas respecto a un criterio dado, es decir, para establecer la importancia o preferencia de alternativas en la matriz de comparaciones a pares.

En la calificación pareada se debe asignar una intensidad con la que un parámetro se relaciona con otro. En la Tabla 2-2 se presenta la escala numérica de comparación para los parámetros. De manera general se tienen 3 posibilidades:

- Una calificación de 1 indicará que el parámetro A tiene igual importancia que el B.

- Una calificación de 2 a 9 indicará dominancia o mayor importancia del parámetro A sobre el B
- Una calificación menor a 1 (1/2, 1/3...1/9) indicará mayor dominancia o importancia del parámetro B sobre el A

Tabla 2-2. Escala de comparación pareada de parámetros

Intensidad	Definición	Explicación
1	Igual importancia	Los dos parámetros contribuyen igualmente a la propiedad o criterio
3	Modernamente más importante un parámetro que el otro	El juicio y la experiencia previa favorecen a un parámetro frente al otro.
5	Fuertemente más importante un parámetro que otro	El juicio y la experiencia previa favorecen fuertemente a un parámetro frente al otro.
7	Mucho más fuerte la importancia de un parámetro que la del otro	Un parámetro domina fuertemente. Su dominación está probada en práctica
9	Importancia extrema de un parámetro frente al otro	Un parámetro domina al otro con el mayor orden de magnitud posible
2, 4, 6, 8	Valores intermedios	Cuando se necesita un compromiso de las partes entre valores contiguos
Recíprocos	$a = 1/a$	El parámetro es inversamente proporcional al valor asignado de a

Fuente: (Saaty, 2004)

En las Tabla 2-3 se presenta la matriz de comparación pareada diseñada para la consulta a expertos y el análisis de los resultados.

Tabla 2-3. Matriz de calificación pareada para los parámetros de vulnerabilidad

Parámetro	Conectividad hidrográfica	Calidad del agua	Declividad	Erodabilidad	Erosividad	Escorrentía
Conectividad hidrográfica	1					
Calidad del agua		1				
Declividad			1			
Erodabilidad				1		
Erosividad					1	
Escorrentía						1

Una vez recopilados los juicios individuales de los expertos, obtenidos mediante matrices individuales de comparación pareada (M_{icp}), se calcularon los pesos relativos de cada criterio, normalizando esta matriz, para crear una nueva matriz individual normalizada (M_{icn}). En este proceso básicamente se dividieron los elementos individuales de cada columna entre la suma de la columna. Posteriormente se calculó el vector de prioridades individuales (V_{pi}) el cual se obtuvo mediante el promedio de cada fila de la matriz individual normalizada.

Para evaluar la consistencia de la matriz individual de comparación pareada, el cual es un indicador del juicio racional por parte del experto, se siguió la metodología aplicada por (Mendoza *et al.*, 2019). Esta metodología consiste en la determinación de un vector total (V_t) que fue calculado mediante la suma ponderada de la matriz individual de comparación pareada y el vector de prioridades individuales ($M_{icp} \times V_{pi}$), este nuevo vector resultante fue denominado Vector Total (V_t). Para cada elemento V_t , se dividió su suma ponderada por la prioridad de su criterio correspondiente para determinar λ_{max} . Posteriormente se procedió a evaluar la consistencia de la matriz como sigue;

Se calculó el índice de consistencia (CI) para cada criterio, donde n es igual al número de criterios.

$$CI = \frac{\lambda_{max} - n}{n - 1} \quad (\text{Ecuación 2})$$

Se determinó el índice aleatorio (IA), calculado de manera empírica como el promedio CI de una muestra grande de matrices de comparación generadas al azar. En la ecuación (3) se denota la expresión.

$$IA = \frac{1,98(n - 2)}{n} \quad (\text{Ecuación 3})$$

Se estableció la razón de consistencia (CR) como:

$$CR = \frac{CI}{IA} \quad (\text{Ecuación 4})$$

Si el resultado de la ecuación (4) es menor o igual a 0.1, el nivel de consistencia es aceptable, con un resultado contrario se recomienda que el experto revise sus estimaciones.

Con base en este procedimiento se realizó el cálculo de las razones de consistencia individuales (CR) y los vectores de prioridades individuales (V_{pi}) para cada uno de los 12 expertos consultados. El paso siguiente consistió en la agregación de todos los juicios individuales de estos expertos para la obtención de un juicio grupal. Para ello se utilizó la metodología empleada por Bernal & Niño (2018) en la cual, cuando el número de juicios es mayor a 1, los jueces o expertos consultados corresponden a un grupo homogéneo y no se

requiere llegar a un consenso; existen dos métodos; agregación de juicios individuales (AIJ) y agregación de prioridades individuales (AIP) como se presenta en la Figura 2-5.

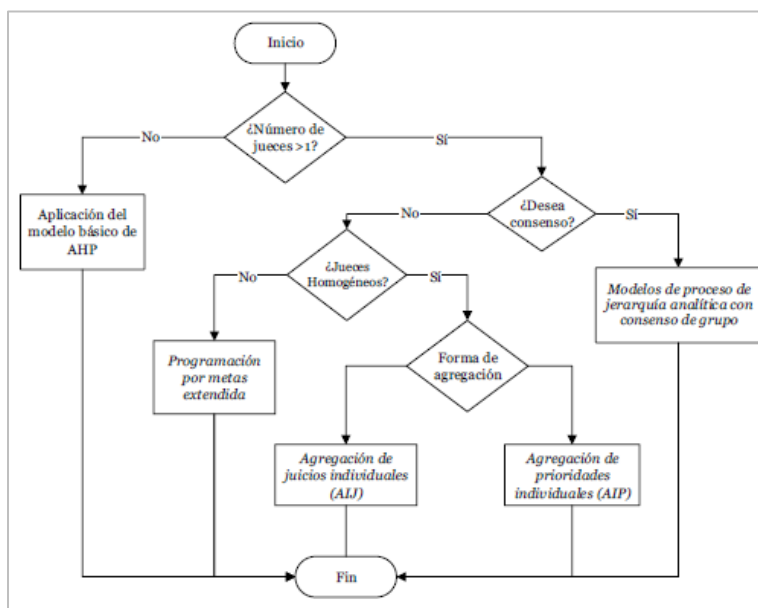


Figura 2-5. Agregación de juicios en AHP

Fuente: Bernal & Niño (2018)

El procesamiento de los resultados obtenidos en la consulta con expertos se realizó con base en la metodología de agregación de prioridades individuales (AIP). El AIP consistió en la transformación de las doce (12) matrices individuales de comparación pareada (M_{icp}) en una matriz grupal de comparación pareada (M_{gcp}) del cual se derivan las prioridades del grupo. Para ello Bernal & Niño (2018) recomiendan el cálculo de la media geométrica para la agregación de N juicios individuales de acuerdo con ecuación 5.

$$M_{gcp} = \sqrt[N]{M_{icp1} * M_{icp2} * M_{icp3}... * M_{icp12}} \quad (\text{Ecuación 5})$$

Una vez obtenida la matriz grupal de comparación pareada (M_{gcp}) se evaluó su consistencia mediante la metodología previamente descrita aplicada a las matrices individuales de comparación pareada (M_{icp}). En la Figura 2-6 se presenta una síntesis de la metodología utilizada para la construcción del índice.

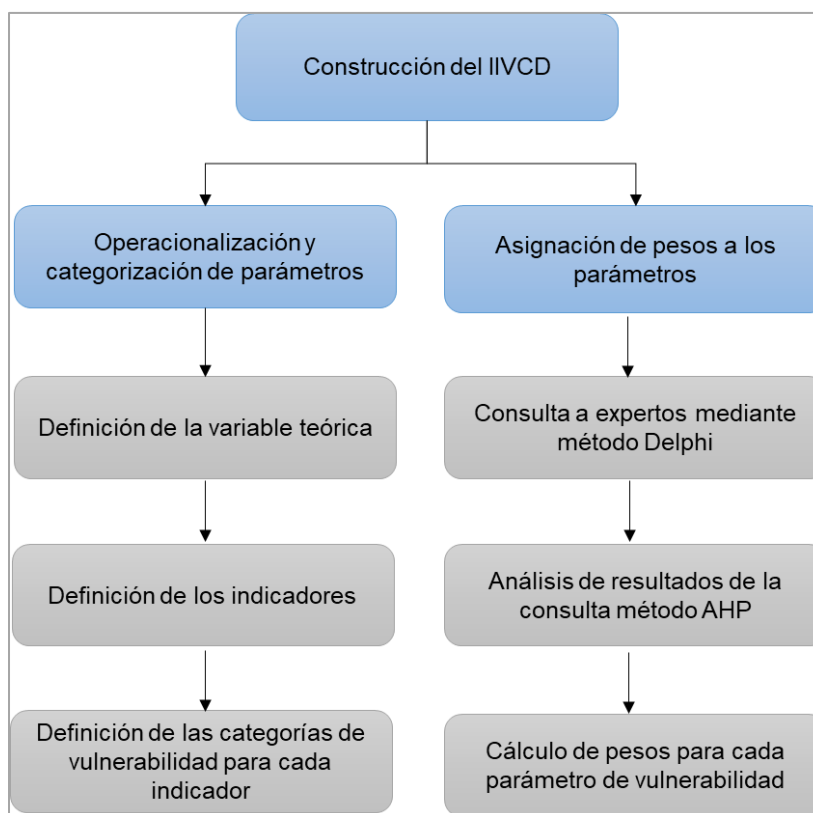


Figura 2-6. Metodología para la construcción del IIVCD

2.4. Aplicación del método construido para la estimación de la vulnerabilidad de los cuerpos de agua superficiales a la contaminación difusa de origen agrícola en un caso de estudio

Para la aplicación del método construido en el desarrollo del objetivo 3 de este estudio se seleccionó la cuenca del río Guachal. La cuenca del río Guachal, es una cuenca de cuarto orden, limita al norte con la cuenca del río Amaime, al sur con las cuencas de los ríos Bolo y Fraile, al oriente con la cuenca del río Amaime y al occidente con el río Cauca. El río Guachal nace de la confluencia de los ríos Bolo y Fraile y desemboca en la margen derecha del río Cauca (CVC, 2017).

La cuenca hidrográfica Guachal, cuenta con un área de 116,140 hectáreas, predominando el ecosistema estratégico de bosque seco y humedales (58,8%). En su jurisdicción se encuentran los municipios de: Candelaria, Florida, Palmira y Pradera (Gobernación del Valle del Cauca, 2018).

El uso de suelo en la cuenca Guachal, está representado principalmente por cultivos permanentes, seguido de pastos para ganadería, cuerpos de agua, e infraestructura industrial. La alta presencia de cultivos permanentes tiene un gran impacto en el área protegida del río, ya que la cantidad en área de cultivos permanentes ubicados en las fajas

de protección es mucho mayor que la cobertura boscosa, lo anterior constituye focos de contaminación sobre el río Guachal, perjudicando directamente el ecosistema. (RICCLISA, 2017). En la Figura 2-7 se presenta la localización general del área de estudio.

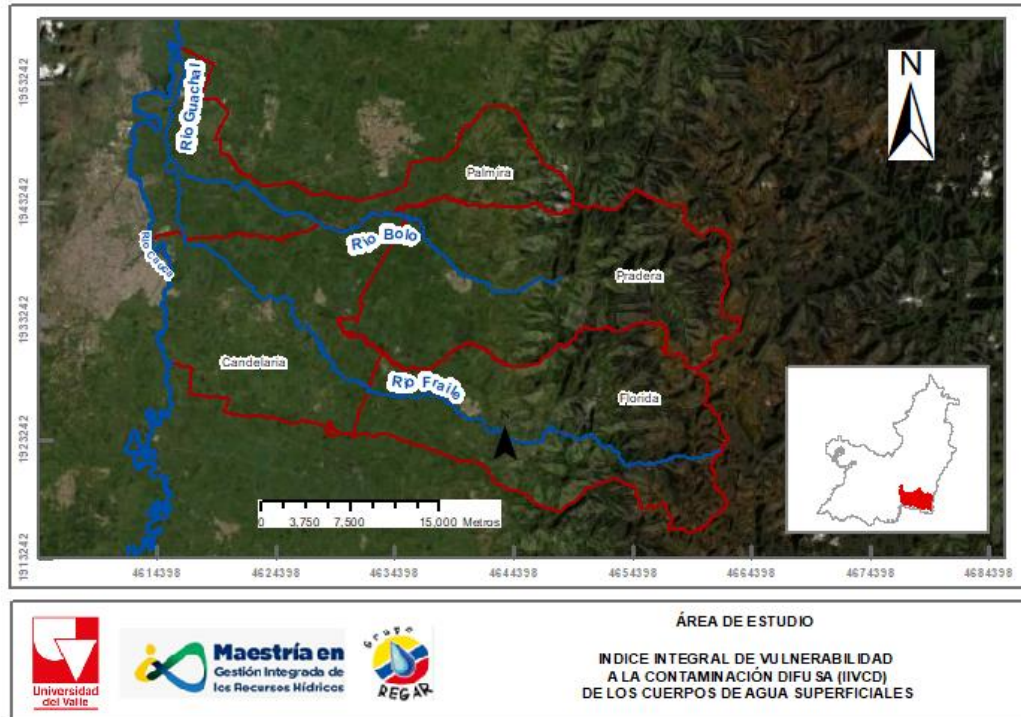


Figura 2-7. Localización de la cuenca del río Guachal

Una vez seleccionada el área de estudio para la aplicación del IIVCD se procedió a recopilar toda la información necesaria para su cálculo, esta información fue tomada de los datos abiertos de la Corporación Autónoma Regional del Valle del Cauca (CVC) y del Instituto Geográfico Agustín Codazzi (IGAC). Esta información se presenta en la Tabla 2-4

Tabla 2-4. Información base para el cálculo del IIVCD

Parámetro	Información base	Fuente	Año
Declividad	Modelo digital de elevación	CVC	2021
Erosividad	Isoyetas de precipitación media mensual multianual y anual	CVC	2016
Escorrentía	Coberturas escala 1:25000	CVC	2021
	Estudio general de suelos escala 1:100000	IGAC	2010
Conectividad hidrográfica	Coberturas escala 1:25000	CVC	2021

Erodabilidad	Estudio general de suelos escala 1:100000	IGAC	2010
Calidad del agua	Resultados de muestreos de calidad del agua para todos los parámetros ICAUCA	CVC	2022

Posteriormente se procedió a procesar toda la información recopilada de acuerdo con los insumos necesarios para el cálculo de cada uno de los parámetros seleccionados según el índice diseñado. En la Figura 2-8 se presenta una síntesis de la metodología utilizada para la aplicación del índice.

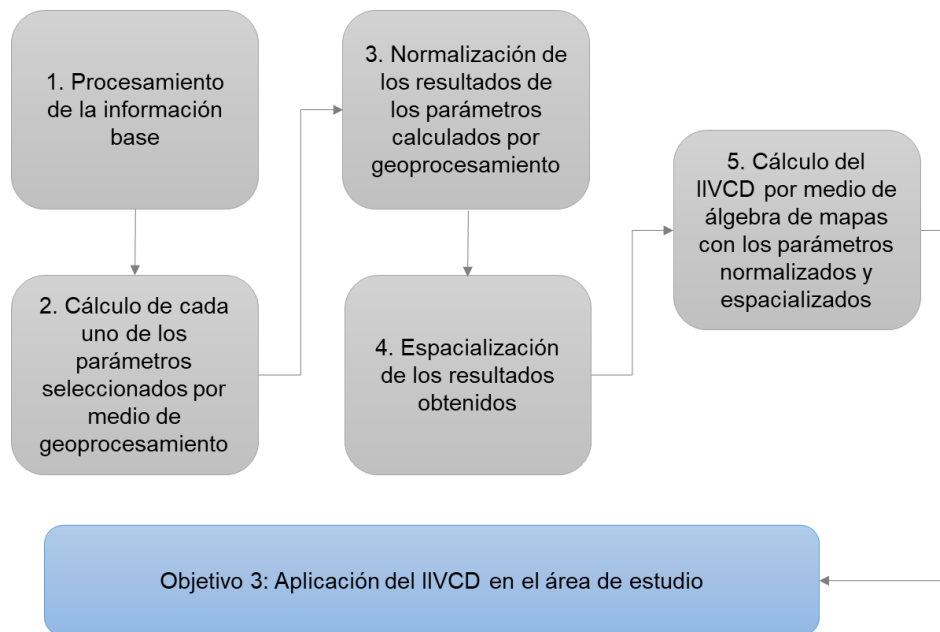


Figura 2-8. Metodología para la aplicación del IIVCD

documentos revisados corresponde a publicaciones de China, Reino Unido y Estados Unidos, lo cual se corresponde con los países de mayor productividad académica en la temática de contaminación difusa. Estos resultados se presentan en la Figura 3-4.

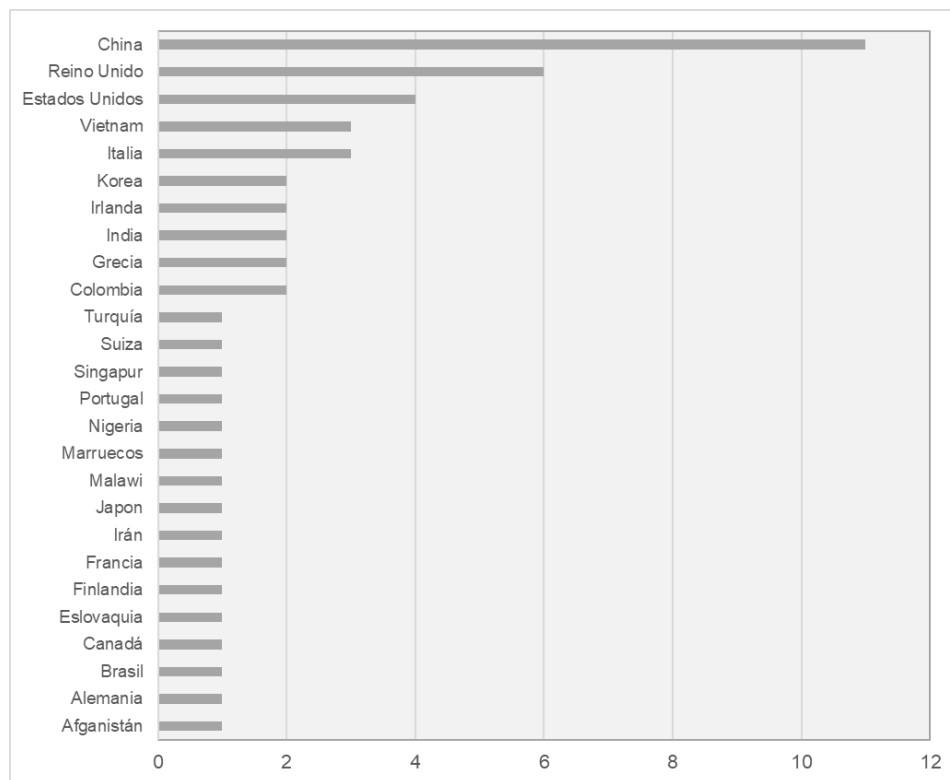


Figura 3-4. Revisión bibliográfica por país de origen de los documentos revisados

Los parámetros que fueron considerados en los artículos consultados fueron extraídos para el estudio de la contaminación difusa y de la vulnerabilidad. A partir de estos parámetros preseleccionados se determinó el porcentaje de citación, de cada parámetro, como el número artículos que consideraron este parámetro en el estudio realizado, con relación al total de artículos revisados. En la Tabla 3-1 se presentan los resultados de la búsqueda de parámetros de vulnerabilidad mediante la revisión bibliográfica.

Tabla 3-1. Matriz preliminar de parámetros de vulnerabilidad

Nº	Parámetro	Porcentaje de citación
1	Conectividad hidrógrfica	40.38%
2	Calidad del agua	40.38%
3	Declividad	30.77%
4	Erodabilidad	30.77%
5	Erosividad	30.77%

N°	Parámetro	Porcentaje de citación
6	Escorrentía	30.77%
7	Cobertura del suelo	28.85%
8	Precipitación	23.08%
9	Pendiente del terreno	19.23%
10	Textura o tipo de suelo	17.31%
11	Capacidad de dilución	15.38%
12	Franjas forestales protectoras	9.62%
13	Flujo superficial	9.62%
14	Inundabilidad	7.69%
15	Estado de contaminación del agua	5.77%
16	Barreras vivas	3.85%
17	Distancia de los cultivos al cuerpo de agua	3.85%
18	Densidad de la red de drenaje	3.85%
19	Orden de la corriente	3.85%
20	Calidad y/o cantidad de sedimentos	3.85%
21	Grado de erosión del suelo	1.92%
22	Presencia de humedales en la cuenca	1.92%
23	Porcentaje de cobertura boscosa	1.92%

Una vez determinado el porcentaje de citación, se seleccionaron los parámetros que tuvieron una proporción mayor al 30%. Es importante considerar que en la matriz preliminar se incluyeron los nombres de los parámetros exactamente como fueron denominados en el estudio del que provienen. Sin embargo, se identificó que algunos parámetros fueron denominados diferente en algunos estudios, pero hace referencia a la misma característica de estudio en una cuenca, por ejemplo, la erosividad que se refiere al potencial de la lluvia para erosionar el suelo (Grimene *et al.*, 2022) ya contiene el efecto de la precipitación. Asimismo, la declividad (Grimene *et al.*, 2022) es un parámetro medido a partir de características topográficas de la cuenca como la pendiente. En consecuencia, algunos parámetros que no fueron incluidos por no tener el porcentaje de citación requerido fueron incluidos en la matriz definitiva de parámetros por encontrarse asociados a parámetros que si fueron seleccionados previamente. Los resultados de la matriz definitiva de parámetros de vulnerabilidad a la contaminación difusa se presentan en la Tabla 3-2.

Tabla 3-2. Matriz definitiva de parámetros de vulnerabilidad

N°	Parámetro	Referencias
1	Conectividad hidrográfica	1-10, 16, 21, 23-24, 26, 37, 39, 44-47
2	Calidad del agua	5, 10, 13-14, 20, 23, 26, 29-33, 35, 37-38, 40-43, 49-50
3	Declividad	1-2, 9-10, 12-13, 21, 24, 27, 30, 34, 38, 42, 47-48, 52

N°	Parámetro	Referencias
4	Erodabilidad	1, 2, 6, 9, 10, 12, 17, 18, 24, 27, 36-38, 50-52
5	Erosividad	1-4, 8, 11, 15, 22, 24-25, 34, 38, 40, 42, 48, 52
6	Escorrentia	1-2, 4, 12, 15, 24, 28, 30, 38, 40-42, 45, 47-48, 50

1. Grimene *et al.*, (2022), 2. Echeverri-Sánchez *et al.*, (2020), 3. Giuliani *et al.*, (2019), 4. Hung *et al.*, (2021), 5. Kaur *et al.*, (2021), 6. Reaney *et al.*, (2019), 7. Shi *et al.*, (2017), 8. Stathatou *et al.*, (2015), 9. Geneviève *et al.*, (2010), 10. Ghiasvand *et al.*, (2021), 11. Xiang, Chen, & Lian (2016), 12. Hai & Phin (2019), 13. Fernandes *et al.*, (2021), 14. Zeleňáková *et al.*, (2021), 15. Gui *et al.*, (2021), 16. Wang *et al.*, (2021), 17. Kiesling *et al.*, (2022), 18. Qin *et al.*, (2020), 19. Sun & Kato (2021), 20. Fernandes *et al.*, (2021), 21. Moncada *et al.*, (2021), 22. Jun *et al.*, (2011), 23. Nguyen *et al.*, (2020), 24. Anandhi & Kannan (2018), 25. Bär (2015), 26. Weissteiner *et al.*, (2014), 27. Yang & Wang (2010), 28. Zhang *et al.*, (2022), 29. Dumont *et al.*, (2012), 30. Ongley (2004), 31. Lee & Bae, (2010), 32. Maniquiz *et al.*, (2012), 33. Bharti & Katyal (2011), 34. Jun *et al.*, (2012), 35. Ayaz *et al.*, (2013), 36. Ouyang *et al.*, (2019), 37. Kiesling *et al.*, (2022), 38. Pang *et al.*, (2022), 39. Owokotomo *et al.*, (2020), 40. Tran *et al.*, (2019), 41. Harrison *et al.*, (2019), 42. Liu *et al.*, (2009), 43. Panagopoulos *et al.*, (2012), 44. Weissteiner *et al.*, (2019), 45. Turunen *et al.*, (2019), 46. Porter *et al.*, (2017), 47. Paton *et al.*, (2020), 48. Leite-Costa *et al.*, (2021), 49. Pullanikkatil *et al.*, (2015), 50. Y. Zhang *et al.*, (2017) 51. Duffy *et al.*, (2020), 52. Shahid *et al.*, (2018).

La correspondencia entre los parámetros elegidos y el tema asociado (recursos hídricos superficiales relacionados a la contaminación por difusa de origen agrícola) se estableció con base en la relación causal entre ese problema y el parámetro que puede influir en ella. Por ejemplo, la contaminación de recursos hídricos superficiales está influenciado por la pendiente que aumenta la escorrentía desde aguas arriba a aguas abajo y facilita la transferencia de partículas contaminantes a los cursos de agua. Los índices asociados a cada parámetro de vulnerabilidad permiten estudio y representación de la variabilidad espacial del parámetro en el área de estudio. A continuación, se presenta una descripción general de cada uno de los parámetros seleccionados y su influencia en la contaminación difusa de los cuerpos de agua superficial:

- **Conectividad hidrográfica:** La contaminación del agua depende en gran medida de la distancia que separa la fuente de contaminación y el cuerpo de agua superficial. La vulnerabilidad aumenta con la proximidad del curso de agua a las tierras de cultivo (Grimene *et al.*, 2022). Además de la distancia, es igualmente importante el tipo de cobertura existente en los espacios que separan los cuerpos de agua de las fuentes de contaminación. Por ejemplo, las franjas forestales protectoras existentes al largo de los cuerpos de agua protegen los suelos del riesgo de erosión, mejoran su estructura y contribuyen a la protección de la calidad del agua de escorrentía reduciendo los riesgos de contaminación difusa. Tanto la cobertura del suelo como la distancia de los cultivos a los cuerpos de agua se ven representados en el parámetro conectividad hidrográfica.
- **Calidad del agua:** Describe las características físicas, químicas y biológicas de los cuerpos de agua. A su vez, estas características determinan la capacidad de autodepuración; la cual se refiere a una serie de procesos físicos, químicos y

biológicos (calidad) que tiene un cuerpo de agua y que permiten la asimilación de cargas contaminantes.

En relación los procesos biológicos, estos se encuentran basados en la degradación en la materia orgánica, a cargo de los microorganismos que se encuentran en el medio, dependiendo la temperatura, la profundidad de la corriente y la concentración de oxígeno disuelto, ya sea por medio aerobio (altas concentraciones de oxígeno) o anaerobio (baja o nula concentración de oxígeno), los cuales por su metabolismo consumen los compuestos orgánicos, los sintetizan y generan nuevos subproductos que liberan oxígeno y eliminan concentraciones de carbono, nitrógeno y azufre (Toussaint-Jiménez, 2019). De acuerdo con lo anterior, condiciones de calidad óptimas como una adecuada concentración de oxígeno disuelto mejorarán la capacidad de autodepuración del cuerpo de agua, en este sentido se presume que una mejor calidad del agua estará relacionada con una menor vulnerabilidad a la contaminación difusa.

- **Declividad:** La inclinación del terreno influye en la infiltración de contaminantes y en la producción de escorrentía del agua, la cual, a su vez, puede transportar residuos de plaguicidas u otros insumos agrícolas hacia los cuerpos de agua, aumentando así la dispersión espacial de los productos fitosanitarios (Grimene *et al.*, 2022).
- **Erodabilidad:** Se refiere a la susceptibilidad del suelo a la erosión hídrica. Este parámetro juega una parte importante en la transferencia potencial de contaminantes según el grado de erodabilidad del suelo, impacta la erosión hídrica, así como el transporte de partículas del suelo cargadas de contaminantes a nivel de la agricultura (Grimene *et al.*, 2022).
- **Erosividad:** Se refiere a la capacidad de las lluvias para erosionar el suelo. La erosividad de la lluvia es un factor empleado como indicador de dicho potencial, y es utilizado ampliamente para la evaluación de la variabilidad espacial y temporal de la erosión del suelo, generada por las precipitaciones (Fernanda *et al.*, 2021). Por tanto, es esencial integrar este parámetro en el proceso de análisis de la vulnerabilidad a la contaminación difusa entendiendo el suelo como un medio de transporte de los contaminantes desde la fuente hasta los cuerpos de agua superficial.
- **Escorrentía:** La escorrentía es una corriente de agua de lluvia que circula sobre la superficie de la tierra cuando rebasa un depósito natural o superficial. El flujo superficial es el medio de transporte donde los contaminantes son conducidos a los cuerpos de agua superficiales como ríos, humedales y lagos. El drenaje se encuentra estrechamente relacionado con la precipitación y la permeabilidad de la tierra (Hai & Phin, 2019).

3.2. Índice Integral de Vulnerabilidad a la Contaminación Difusa (IIVCD) de los cuerpos de agua superficiales

El diseño del IIVCD se realizó en dos fases; una corresponde a la operacionalización y categorización de los parámetros y la segunda corresponde a la asignación de los pesos a los parámetros seleccionados. A continuación, se presentan los resultados de cada uno de los pasos descritos en el aparte metodológico para este objetivo:

3.2.1. Operacionalización y categorización de parámetros de vulnerabilidad

A. Definición de la variable teórica:

La vulnerabilidad a la contaminación difusa es entendida como el nivel en que un cuerpo de agua superficial es susceptible e incapaz de hacer frente a lesiones, daños o perjuicios (contaminación). Es una función de la exposición del sistema a las amenazas (actividades antrópicas), su sensibilidad y su capacidad de adaptación (Stathatou *et al.*, 2016). En este sentido, el autor define estos tres conceptos como;

- Exposición: la naturaleza, el grado, la duración y/o la medida en que el sistema está en contacto o sujeto a perturbaciones.
- Sensibilidad: el grado en que un sistema puede ser modificado o afectado (adversa o beneficiosamente, directa o indirectamente) por una perturbación o conjunto de perturbaciones.
- Capacidad adaptativa: la habilidad de un sistema para ajustarse a las perturbaciones, para moderar los daños potenciales, para aprovechar las oportunidades o para hacer frente a las consecuencias de las transformaciones que ocurren.

B. Definición de los parámetros e indicadores:

En la Figura 3-5 se presentan los resultados del proceso de definición de los parámetros e indicadores de la vulnerabilidad el cual constituye la operacionalización de estos. La operacionalización puede ser entendida como el proceso por el cual se transforma o traduce una variable teórica en variables empíricas directamente observables con la finalidad de poder medirlas (Cazau, 2004). Cada parámetro (segundo nivel en la Figura 3-5) fue cuantificado mediante un indicador de vulnerabilidad (I), posteriormente fue ponderado por el peso asignados por los expertos (W) para conformar finalmente el IIVCD mediante sumatoria como fue descrito en la ecuación 1.

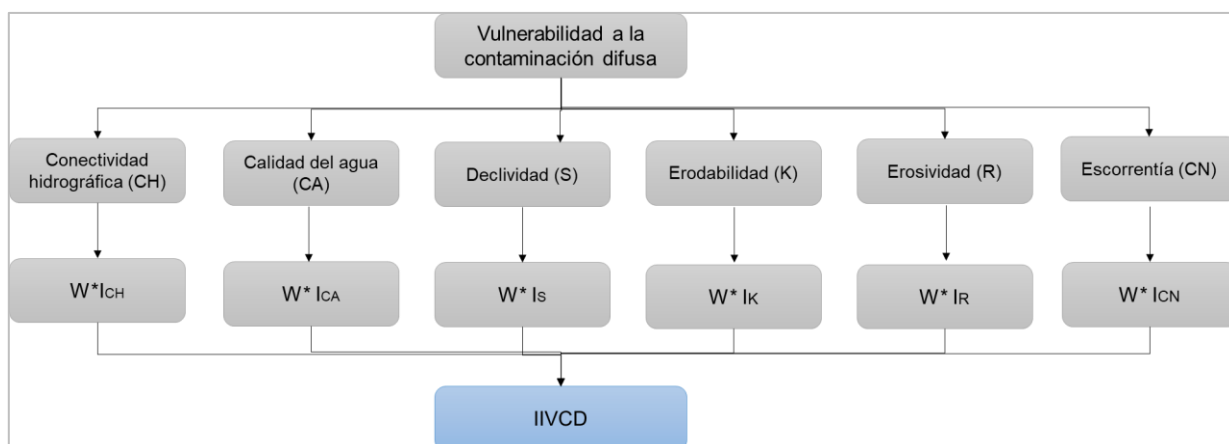


Figura 3-5. Resultados de la operacionalización de parámetros de vulnerabilidad

C. Categorización y normalización de los indicadores de vulnerabilidad

Una escala de medición es el conjunto de los posibles valores que una cierta variable puede tomar. Es un continuo de valores ordenados correlativamente, que admite un punto inicial y otro final. El nivel en que una variable puede ser medida determina las propiedades de medición de una variable, el tipo de operaciones matemáticas que puede usarse apropiadamente con dicho nivel, las fórmulas y procedimientos estadísticos que se utilizan para el análisis de datos y la prueba de hipótesis teóricas. Las escalas o niveles de medición se utilizan para medir variables o atributos. Por lo general, se distinguen cuatro escalas o niveles de medición: nominal, ordinal, intervalos y escalas de proporción, cociente o razón. Las dos primeras (nominal y ordinal) se conocen como escalas categóricas, y las dos últimas (intervalo y razón) como escalas numéricas. Las escalas categóricas se usan comúnmente para variables cualitativas, mientras que las numéricas son adecuadas para la medición de variables cuantitativas (Coronado-Padilla, 2007).

Para la categorización de los parámetros de vulnerabilidad seleccionados en la construcción del IIVCD se utilizó una escala de medición categórica ordinal, en la cual las observaciones pueden establecerse en un orden relativo con respecto a la característica que se evalúa, es decir, las categorías de datos están clasificadas u ordenadas de acuerdo con la característica especial que poseen. En esta escala de medición las etiquetas o símbolos de las categorías sí indican jerarquía y son mutuamente excluyentes, es decir que un dato no puede ser clasificado en dos categorías simultáneamente.

Las categorías del indicador corresponden seleccionadas fueron “Nula”, “Muy baja”, “Baja”, “Moderada”, “Alta”, “Muy alta” y “Severa”. Estas categorías varían para cada indicador de manera que algunos tendrán las siete categorías, otros cinco y otros tres, de acuerdo con la naturaleza de la variable que se mide en cada indicador. El valor máximo que puede tomar el indicador es 1.0 y el valor mínimo es 0.0. Los valores cercanos a uno (1.0) están relacionados con las propiedades del sistema que general una vulnerabilidad alta y los valores cercanos a cero (0.0) está asociados a vulnerabilidad baja. A continuación,

se presenta una descripción de cada uno de los indicadores del IIVCD y sus escalas de medición.

Indicador de conectividad hidrográfica (I_{CH}): Se refiere a la cuantificación de la existencia de zonas de amortiguamiento (humedales, franjas forestales protectoras, etc) entre los cultivos y los cuerpos de agua superficial. Si un cultivo se encuentra sobre las márgenes del curso de agua se consideró de conexión hidrográfica directa y la valoración de vulnerabilidad de esta zona fue alta, si entre el cultivo y el cuerpo de agua hay presencia de zonas de amortiguamiento se consideró esta zona como de vulnerabilidad media, si no existe cultivo cerca a los cuerpos de agua se consideró como una zona sin conexión y su vulnerabilidad es baja. Para realizar esta clasificación se tomaron las coberturas amortiguadoras como bosques, lagunas, estanques artificiales, humedales, entre otros, como atenuantes de la vulnerabilidad en cada distancia evaluada y, por tanto, tuvieron una calificación de vulnerabilidad menor. La categorización de este indicador se realizó con base en los resultados de Echeverri-Sánchez *et al.*, (2020) y Grimene *et al.*, (2022) y se presentan en la Tabla 3-3.

Tabla 3-3. Categorización y normalización del indicador conectividad hidrográfica (I_{CH})

Indicador	Valor normalizado	Indicador de vulnerabilidad
Conectividad hidrográfica	0.25	Baja
	0.50	Media
	0.75	Alta
	1.00	Muy Alta

El indicador de calidad del agua (I_{CA}): Una de las herramientas más empleadas para la evaluación y el análisis integral de la calidad del recurso hídrico son los índices de calidad del agua (ICA). A nivel mundial se han desarrollado diferentes ICA, entre los que se destaca el de la *National Sanitation Foundation* (ICA– NSF) desarrollado para ríos de Estados Unidos y ampliamente empleado y validado o adaptado en diferentes estudios internacionales. Dinius desarrolló un ICA similar teniendo como valor agregado el planteamiento de rangos de clasificación basados en usos específicos, entre los que se destaca el del consumo humano. La Corporación Autónoma Regional del Valle del Cauca —CVC— y la Universidad del Valle (2004) adaptaron un ICA a partir de los ICA NSF, Dinius, CETESB e ICOSUS, denominado ICAUCA (Torres *et al.*, 2010).

Debido a que el área de estudio se encuentra ubicada en la cuenca del río Cauca, se optó por seleccionar el ICAUCA como el ICA más representativo para la evaluación de la calidad del agua en el cálculo del IIVCD. A continuación, se presenta el procedimiento para el cálculo del ICAUCA el cual es un promedio geométrico ponderado (Torres *et al.*, 2010):

$$ICAUCA = \prod_{i=1}^n I_i^{w_i} \quad (\text{Ecuación 5})$$

Donde;

W_i : Peso o porcentaje asignado al i-ésimo parámetro

I_i : subíndice del i-ésimo parámetro

En la Tabla 3-4 se presentan las ecuaciones para el cálculo de los subíndices para el ICAUCA, a partir de la información de calidad del agua y en la Tabla 3 5 se presenta la categorización de indicador de calidad del agua.

Tabla 3-4. Funciones de los subíndices para cada parámetro del ICAUCA

Parámetro	Ponderación (W)	Ecuación del subíndice
Demanda Bioquímica de Oxígeno (DBO ₅)	0.15	$I_{DBO_5} = e^{(4.5824 - 0.1078 DBO_5 + 2.4581 \cdot 10^{-14} e^{DBO_5})}$ Si DBO ₅ > 30 mg/L, I _{DBO5} = 2
Porcentaje oxígeno disuelto (%Sat)	0.21	$I_{\%sat} = e^{(1.3663 + 0.063\%sat - 0.000303\%sat^2)}$ Si %Sat > 140, I _{%Sat} =50
Turbiedad (Turb)	0.08	$I_{Turb} = e^{(4.561 - 0.0196 Turb + 2.4167 \cdot 10^{-5} Turb^2)}$ Si Turb > 100 UNT, I _{Turb} =5
Sólidos Totales (ST)	0.07	$I_{ST} = \frac{1}{0.0123 - 1.3545 \cdot 10^{-5} ST + 9.265 \cdot 10^{-8} ST^2}$ Si ST > 500 mg/l, I _{ST} =20
pH	0.08	$I_{pH} = e^{-7.6434pH + 18.5352 \frac{1}{pH} + 14.625 [Ln(pH)]^2}$ Si pH < 2 o pH > 12 und I _{pH} =0
Coliformes totales (CT)	0.15	$I_{CT} = e^{4.5685 - 0.1305 Ln(CT) - 0.0129 [Ln(CT)]^2}$ Si CT > 10 ⁵ /100 ml, I _{CT} =2
Nitrógeno total (NT)	0.08	$I_N = e^{(4.4706 - 0.043NT + 2.8813 \cdot 10^{-5} NT^2)}$ Si NT > 100 mg/l, I _{NT} =1
Fósforo Total (PT)	0.08	$I_{PT} = \frac{1}{0.0084 + 0.0143PT + 0.00074PT^2}$ Si PT > 10 mg/l, I _{PT} =2
Color	0.05	$I_{color} = 127 color^{-0.2394}$
Sólidos suspendidos totales (SST)	0.05	$I_{SST} = -0.3005 SST + 102.11$ Si SST ≤ 10 mg/l, I _{SST} = 100 Si SST ≤ 340 mg/l, I _{SST} = 2

Fuente: (Patiño *et al.*, 2010)

Tabla 3-5. Categorización y normalización del indicador de calidad del agua

Parámetro	Categorías del indicador	Valor normalizado	Indicador de vulnerabilidad
Calidad del agua	Excelente calidad	0.20	Muy baja
	Buena calidad	0.40	Baja
	Regular calidad	0.60	Media
	Mala calidad	0.80	Alta
	Pésima calidad	1.00	Muy alta

Declividad (I_s): El cálculo de la declividad se realizó con base en un mapa de pendientes a partir de la mejor información disponible en la cuenca objeto de estudio; también podría realizarse a partir de topografía levantada en campo o modelos digitales de elevación. Una vez obtenidas las pendientes estas fueron categorizadas según los resultados de Echeverri-Sánchez *et al.*, (2020) cómo se presenta en la Tabla 3-6.

Tabla 3-6. Categorización y normalización del indicador de declividad

Parámetro	Categorías del indicador	Valor normalizado	Indicador de vulnerabilidad
Declividad	Plano	0.14	Nula
	Ligeramente inclinado	0.29	Muy baja
	Moderadamente inclinado	0.43	Baja
	Fuertemente inclinado	0.57	Moderada
	Ligeramente escarpado	0.71	Alta
	Moderadamente escarpado	0.86	Muy alta
	Fuertemente escarpado	1.00	Severa

Erodabilidad (I_k): La cuantificación de erodabilidad del suelo se realizó partir del cálculo de factor de erodabilidad del suelo K, de la ecuación universal de pérdida de suelo (USLE, por sus siglas en inglés). El factor K representa el grado de resistencia natural que ofrece el suelo a ser erosionado, al actuar sobre éste los otros factores erosivos. Este factor refleja el hecho que diferentes suelos se erosionan a diferentes tasas, cuando los demás factores que afectan la erosión son los mismos (Andrés Ramírez-Ortiz *et al.*, 2009). El factor K-USLE puede ser determinado mediante el establecimiento y mantenimiento de parcelas de escorrentía bajo condiciones de lluvia natural, por un período mínimo de 3 a 5 años. Este método es costoso y requiere de mucho tiempo en las operaciones; las parcelas pueden establecerse en un número limitado de suelos (Andrés Ramírez-Ortiz *et al.*, 2009). Por tales razones, se han generado modelos de regresión múltiple como los de (Wischmeier & Smith (1978) , que utilizan algunas propiedades físicas y químicas de los suelos. En la ecuación 6 se describe el modelo utilizado para este estudio.

$$100K = 10^{-4} * 2.71 * M^{1.14}(12 - a) + 4.20(b - 2) + 3.23(c - 3) \quad (\text{Ecuación 6})$$

Donde;

M: Factor representativo de la textura (100 - %arcilla) X (%limo + arena fina)

a: Porcentaje de materia orgánica

b: Número correspondiente a la estructura del suelo según nomograma valor del factor K (Wiscmeir y Smith, 1978):

- 1: Gránulo muy fino y grumo muy fino (< 1 mm)
- 2: Gránulo y grumo finos (1 - 2 mm)
- 3: Gránulo y grumo medio (2 -5 mm) y gránulo grueso (5 - 10 mm)
- 4: Gránulo liso, prismático, columnar y muy grueso (> 10 mm)

c: Clase de permeabilidad del perfil, según nomograma valor del factor K (Wiscmeir y Smith, 1978):

- 1: Rápida a muy rápida
- 2: Medianamente rápida
- 3: Moderada
- 4: Moderadamente lenta
- 5: Lenta
- 6: Muy lenta

Una vez se ha calculado el factor de K, los resultados fueron categorizados con base en el estudio realizado por (Andrés Ramírez-Ortiz *et al.*, 2009) como se presenta en la Tabla 3-7;

Tabla 3-7. Categorización y normalización del indicador de erodabilidad

Parámetro	Categorías del indicador	Valor normalizado	Indicador de vulnerabilidad
Erodabilidad	<0.01	0.13	Natural
	0.01 a 0.02	0.25	Muy baja
	0.02 a 0.04	0.38	Baja
	0.04 a 0.06	0.50	Media
	0.06 a 0.08	0.63	Alta
	0.08 a 0.10	0.75	Muy alta
	0.01 a 0.15	0.88	Severa
	> 0.15	1.00	Extremadamente severa

Erosividad (I_R): Uno de los índices más destacados para medir la erosividad de la lluvia y su distribución es el Índice Modificado de Fournier (IMF) (Adriana *et al.*, 2015). El IMF se basa en la sumatoria de las precipitaciones mensuales con relación a la precipitación total del año correspondiente y se fundamenta en el hecho de que no solo el mes de mayor precipitación produce erosión superficial, sino que hay meses con menores cantidades de precipitación que también producen erosión, por lo que ha sido más aceptado,

especialmente para zonas tropicales (Mosquera *et al.*, 2021). En este sentido se calculó el IMF para el área de estudio seleccionada se según la ecuación descrita a continuación;

$$IMF = \sum_{i=1}^{12} \frac{p_i^2}{p} \quad (\text{Ecuación 7})$$

Donde p_i es la precipitación mensual del mes “i” que va de enero hasta diciembre del año correspondiente y p es la precipitación anual.

Una vez calculado el IMF en [mm/año], los resultados fueron clasificados con base en el estudio realizado por (Mosquera *et al.*, 2021) como se presenta en la Tabla 3-8.

Tabla 3-8. Categorización y normalización del indicador de erosividad

Parámetro	Categorías del indicador	Valor normalizado	Indicador de vulnerabilidad
Erosividad	<60	0.20	Muy baja
	60 a 90	0.40	Baja
	90 a 120	0.60	Media
	120 a 160	0.80	Alta
	>160	1.00	Muy alta

Escorrentía (I_{CN}): Uno de los métodos para obtener la escorrentía superficial es el del Número de Curva. Este método fue elaborado por *U.S. Soil Conservation Service* y se basa en la estimación directa de la escorrentía superficial de una lluvia, a partir de las características del suelo, uso de este y de su cobertura vegetal.

Se supone que cada uno de los complejos suelo – vegetación se comporta de una misma forma frente a la infiltración. En un complejo suelo – vegetación totalmente impermeable toda la precipitación se convierte en escorrentía superficial. Por el contrario, un complejo totalmente permeable no daría escorrentía fuera cual fuere el valor de la precipitación.

Para estandarizar las curvas características de la precipitación efectiva en muchas cuencas, el SCS definió un número adimensional de curva CN, tal que $0 \leq CN \leq 100$. Para superficies impermeables y superficies de agua $CN=100$; para superficies naturales $CN < 100$ (Chow, 1994). Se realizó una clasificación del CN según el grupo hidrológico del suelo (Tabla 3-9).

Tabla 3-9. Grupos hidrológicos del suelo

Grupo hidrológico	Descripción
A	Arena profunda, suelos profundos depositados por el viento, limos agregados
B	Suelos poco profundos depositados por el viento, marga arenosa

Grupo hidrológico	Descripción
C	Margas arcillosas, margas arenosas poco profundas, suelos con bajo contenido orgánico y suelos con altos contenidos de arcilla
D	Suelos que se expanden significativamente cuando se mojan, arcillas altamente plásticas y ciertos suelos salinos

Fuente: (Chow,1994)

Los valores de CN también dependen del antecedente de humedad del suelo (Chow, 1984) clasificados en tres condiciones AMC (*Antecedent moisture conditions*: Condición AMC(I): Suelo Seco; Los suelos en la cuenca están secos; Condición AMC(II): Suelo medio; Asociado a crecidas anuales o promedios y Condición AMC (III): Suelo húmedo; Caudales grandes (ver Tabla 3-10). Los suelos en la cuenca se encuentran en estado muy húmedo, esto se presenta cuando ha llovido mucho durante los cinco días anteriores a la tormenta, y el suelo está casi saturado. Para el cálculo de CN en esta metodología se tomó como referencia la condición de humedad antecedente II ya que corresponde a una condición de humedad promedio en la cuenca.

Tabla 3-10. Rangos para la clasificación de las condiciones

GRUPO AMC	Lluvia antecedente total de 5 días (Pulg)	
	Estación Inactiva (seca)	Estación Activa (de crecimiento)
I	<0.5	<1.4
II	0.5 a 1.1	1.4 a 2.1
III	Sobre 1.1	Sobre 2.1

Fuente: (Chow,1984)

La determinación de CN se realizó con base en la información de coberturas disponible para la cuenca de estudio. A partir de esta información se reclasificaron las coberturas de uso, según la cobertura y el grupo hidrológico del suelo como se presenta en la Tabla 3-11.

Tabla 3-11. Número de curva de escorrentía para usos selectos de la tierra agrícola suburbana y urbana (condiciones antecedentes de humedad II, $I_a = 0.2S$)

Descripción del uso de la tierra	Grupo hidrológico del suelo			
	A	B	C	D
Tierra cultivada:				
sin tratamientos de conservación	72	81	88	91
con tratamientos de conservación	62	71	78	81
Pastizales:				
condiciones pobres	68	79	86	89

Descripción del uso de la tierra	Grupo hidrológico del suelo			
	A	B	C	D
condiciones óptimas	39	61	74	80
Vegas de los ríos: condiciones óptimas	30	58	71	78
Bosques:				
troncos delgados, cubierta pobre, sin hierbas	45	66	77	83
cubierta buena ¹	25	55	70	77
Áreas abiertas: césped, parques, campos de golf, cementerios, etc.				
óptimas condiciones: cubierta de pasto en el 75% o más	39	61	74	80
condiciones aceptables: cubierta de pasto en el 50% al 75%	49	69	79	84
Áreas comerciales de negocios (85% impermeables)	88	91	94	95
Distritos industriales (72% impermeables)	81	88	91	93
Residencial²				
Tamaño promedio del lote	Porcentaje promedio impermeable ³			
1/8 acre o menos	65	77	85	90
1/4 acre	38	61	75	83
1/3 acre	30	57	72	81
1/2 acre	25	54	70	80
1 acre	20	51	68	79
Parqueaderos pavimentados, techos, accesos, etc ⁴ .	98	98	98	98
Calles y carreteras:				
Pavimentados con cunetas y alcantarillados ⁴	98	98	98	98
grava	76	85	89	91
tierra	72	82	87	89

Fuente: (Chow,1994)

1. Una buena cubierta está protegida por el pastizal y los desechos del retiro de la cubierta del suelo.

2. Los números de curva se calculan suponiendo que la escorrentía desde las casas y los accesos se dirige hacia la calle, con un mínimo del agua del techo dirigida hacia el césped donde puede ocurrir infiltración adicional.

3. Las áreas permeables restantes (césped) se consideran como pastizales en buena condición para estos números de curva.

4. En algunos países con climas más cálidos se puede utilizar 95 como número de curva.

Una vez se ha calculado el número de curva CN para la cuenca en estudio, los resultados fueron categorizados como se presenta en la Tabla 3-12;

Tabla 3-12. Categorización y normalización del indicador de escorrentía

Parámetro	Categorías del indicador	Valor normalizado	Indicador de vulnerabilidad
Escorrentía	Permeable <50	0.33	Baja
	Semipermeable 51 - 79	0.66	Media
	Impermeable > 90	1.0	Alta

3.2.2. Asignación de pesos a los parámetros de vulnerabilidad

La asignación de los pesos para cada uno de los parámetros de vulnerabilidad, seleccionados mediante revisión bibliográfica, se realizó por medio de una consulta a expertos. La consulta tuvo una duración de un mes y se consultó un total de 33 expertos a través de correo electrónico, posterior al tiempo estipulado para la consulta se obtuvo respuesta de 12 expertos los cuales se describen en la Tabla 3-13.

Tabla 3-13. Listado de expertos que participaron en la consulta para la asignación de pesos a los parámetros de vulnerabilidad

N°	Nombre	Institución	Perfil	Correo	País
E1	Aldemar Reyes	Universidad del Valle	Doctorado en Ingeniería Universidad del Valle Maestría en Ingeniería Sanitaria y Ambiental Universidad del Valle Ingeniero Agrícola Universidad del Valle Grupo de Investigación: Grupo de Investigación en Ingeniería de Recursos Hídricos y Suelos - IREHISA	aldemar.reyes@correounivalle.edu.co	Colombia
E2	Ana María Buitrago	Universidad del Valle	Estudiante de Maestría en Gestión Integrada de Recursos Hídricos Especialista en Implementación de Sistemas de Información Geográfica Administradora Ambiental Universidad Tecnológica de Pereira Grupo de Investigación: Riego para el Desarrollo Agrícola y Seguridad Alimentaria – REGAR	ana.maria.buitrago@correounivalle.edu.co	Colombia
E3	Andrés Echeverri	Universidad del Valle	Doctorado en Ingeniería Maestría en Ingeniería Sanitaria y Ambiental Ingeniero Agrícola Universidad del Valle Grupo de Investigación: Riego para el Desarrollo Agrícola y Seguridad Alimentaria – REGAR	andres.echeverri@correounivalle.edu.co	Colombia

Índice Integral de Vulnerabilidad a la Contaminación Difusa de Origen Agrícola - IIVCD

N°	Nombre	Institución	Perfil	Correo	País
E4	Francisco José Alcón Provencio	Universidad Politécnica de Cartagena Escuela Técnica Superior de Ingeniería Agronómica	Doctor Especialista en Economía Agraria Ingeniero Agrónomo Universidad Politécnica de Cartagena	francisco.alcon@upct.es	España
E5	Inés Restrepo	Universidad del Valle	Doctorado Universidad de Leeds, Reino Unido Maestría en Ingeniería de Sistemas Universidad del Valle Ingeniera Sanitaria Universidad del Valle Instituto CINARA	ines.restrepo@correounivalle.edu.co	Colombia
E6	Itzel Galaviz-Villa	Instituto Tecnológico de Boca del Río	Doctor en Ciencias en Agroecosistemas Maestro en Ciencias en Acuicultura Instituto Tecnológico del Mar	itzelgalaviz@bdelrio.tecnm.mx	México
E7	Jhon Jairo Márquez	Universidad del Valle	Doctorado en Ciencias Agropecuarias Universidad de Buenos Aires Maestría en Ingeniería de Recursos Hídricos Universidad Nacional del Litoral Ingeniero Agrícola Universidad del Valle	john.marquez@correounivalle.edu.co	Colombia

Índice Integral de Vulnerabilidad a la Contaminación Difusa de Origen Agrícola - IIVCD

N°	Nombre	Institución	Perfil	Correo	País
E8	Lakhvinder Kaur	Departamento de Estudios Ambientales, Universidad de Panjab	Licenciatura en Ciencias Doctora en Filosofía - PhD, Ciencias Ambientales Maestría en ciencias	lakhvinderkaurbasra@gmail.com	India
E9	Melissa Gómez	Universidad Tecnológica de Pereira	Doctorado en Ciencias Ambientales Universidad Tecnológica de Pereira Magister en Ecotecnología Universidad Tecnológica de Pereira Administradora Ambiental Universidad Tecnológica de Pereira Grupo de Investigación en Agua y Saneamiento	meangomez@utp.edu.co	Colombia
E10	Paola Zambrano	Universidad del Valle	Estudiante de Maestría en Gestión Integrada de Recursos Hídricos Ingeniera Sanitaria y Ambiental Universidad del Valle Grupo de Investigación: Riego para el Desarrollo Agrícola y Seguridad Alimentaria – REGAR	paola.zambrano@correounivalle.edu.co	Colombia
E11	Sandra Milena Barona	Grupo REGAR Universidad del Valle	Estudiante de Maestría en Gestión Integrada de Recursos Hídricos Ingeniera Agrícola Universidad del Valle Grupo de Investigación: Riego para el Desarrollo Agrícola y Seguridad Alimentaria – REGAR	barona.sandra@correounivalle.edu.co	Colombia

Índice Integral de Vulnerabilidad a la Contaminación Difusa de Origen Agrícola - IIVCD

N°	Nombre	Institución	Perfil	Correo	País
E12	Martha Daza	Universidad del Valle	Doctorado en Ingeniería Sanitaria y Ambiental Universidad del Valle Universidad Nacional de Colombia Ingeniera Agrícola Universidad Nacional de Colombia	martha.daza@correounivalle.edu.co	Colombia

El procesamiento de los resultados de la consulta se realizó mediante AHP, donde se obtuvo un vector de prioridades y una razón de consistencia para cada matriz individual de comparación pareada las cuales se presentan en el anexo. En la Figura 3-6 se presentan los resultados de la priorización de los parámetros seleccionados por parte de los expertos consultados, en la

Tabla 3-14 se presentan los resultados de la matriz grupal de comparación pareada (M_{gcp}), en la En la Tabla 3-15 se presentan los resultados de los vectores finales de prioridades de los expertos y el índice y razón de consistencia asociada al procesamiento de esta matriz. De acuerdo con los resultados obtenidos, es posible concluir que la matriz grupal de comparación pareada es consistente, con una razón de consistencia de 0.02 el cual es mucho menor al límite de consistencia establecido 0.1.

Tabla 3-15 los resultados del cálculo de la razón de consistencia de M_{gcp} la cual y, finalmente en En la Tabla 3-16 se presenta el resultado final de los pesos obtenidos en la consulta con expertos para los parámetros del IIVCD. Los parámetros de mayor importancia en este índice fueron la declividad y la erosividad, cada uno con un valor de 0.2 del peso total del índice. El parámetro escorrentía resultó ser el segundo en importancia para el IIVCD con un valor ponderado en 0.18. los parámetros de conectividad hidrográfica y erodabilidad se ubicaron en cuarto y quinto lugar con valores de 0.16 y 0.15, respectivamente. Finalmente, calidad del agua fue el parámetro con el menor valor, ponderado en 0.11 para los expertos.

Tabla 3-16 se presentan los resultados de la asignación de los pesos a los parámetros seleccionados mediante la consulta a expertos y el procesamiento AHP.

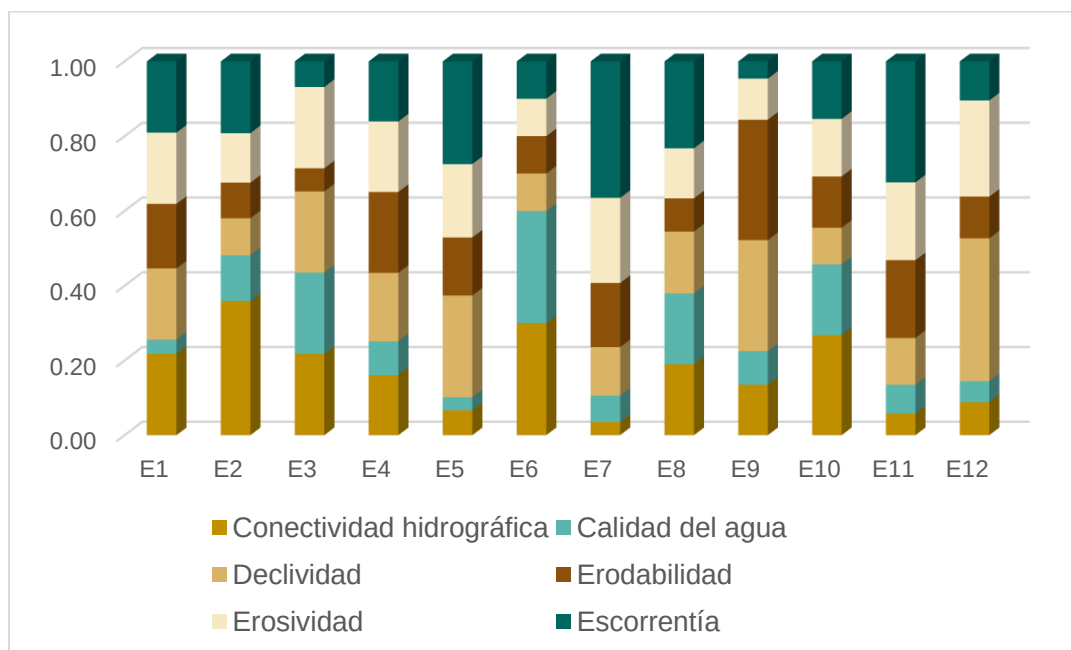


Figura 3-6. Prioridad de cada parámetro para cada experto consultado

Tabla 3-14. Matriz grupal de comparación pareada para la asignación de pesos de los parámetros del IIVCD

Parámetro*	P1	P2	P3	P4	P5	P6
P1	1.00	2.11	0.62	0.88	0.76	1.08
P2	0.47	1.00	0.54	0.71	0.57	0.90
P3	1.61	1.86	1.00	0.87	1.02	1.21
P4	1.14	1.41	1.15	1.00	0.57	0.61
P5	1.32	1.74	0.98	1.76	1.00	0.77
P6	0.93	1.12	0.83	1.64	1.30	1.00

*P1 Conectividad hidrográfica; P2 Calidad del agua; P3 Declividad; P4 Erodabilidad; P5 Erosividad; P6 Escorrentía.

En la Tabla 3-15 se presentan los resultados de los vectores finales de prioridades de los expertos y el índice y razón de consistencia asociada al procesamiento de esta matriz. De acuerdo con los resultados obtenidos, es posible concluir que la matriz grupal de comparación pareada es consistente, con una razón de consistencia de 0.02 el cual es mucho menor al límite de consistencia establecido 0.1.

Tabla 3-15. Razón de consistencia de la matriz grupal de comparación pareada M_{gcp}

Parámetro	Vector prioridades	Vector total	Consistencia M_{gcp}	
P1	0.16	1.00	λ_{max}	6.16
P2	0.11	0.68	n	6.00
P3	0.20	1.22	IC	0.03
P4	0.15	0.94	IA (Índice de consistencia aleatoria)	1.32
P5	0.20	1.20	RC (razón de consistencia)	0.02
P6	0.18	1.12	1/RC	41.89

En la Tabla 3-16 se presenta el resultado final de los pesos obtenidos en la consulta con expertos para los parámetros del IIVCD. Los parámetros de mayor importancia en este índice fueron la declividad y la erosividad, cada uno con un valor de 0.2 del peso total del índice. El parámetro escorrentía resultó ser el segundo en importancia para el IIVCD con un valor ponderado en 0.18. los parámetros de conectividad hidrográfica y erodabilidad se ubicaron en cuarto y quinto lugar con valores de 0.16 y 0.15, respectivamente. Finalmente, calidad del agua fue el parámetro con el menor valor, ponderado en 0.11 para los expertos.

Tabla 3-16. Pesos asignados a los parámetros del IIVCD

Abreviatura	Parámetro	Peso (W)
-------------	-----------	----------

Índice Integral de Vulnerabilidad a la Contaminación Difusa de Origen Agrícola - IIVCD

I_S	Declividad	0.20
I_R	Erosividad	0.20
I_{CN}	Escorrentía	0.18
I_{CH}	Conectividad hidrográfica	0.16
I_K	Erodabilidad	0.15
I_{CA}	Calidad del agua	0.11

3.2.3. Ecuación final para el cálculo del IIVCD

A continuación, se presenta la ecuación para el cálculo del IIVCD:

$$IIVCD = (0.20 I_S + 0.20 I_R + 0.18 I_{CN} + 0.16 I_{CH} + 0.15 I_K + 0.11 I_{CA}) \quad (\text{Ecuación 8})$$

Donde;

I_S es el valor normalizado del indicador de declividad

I_R es el valor normalizado del indicador de erosividad

I_{CN} es el valor normalizado del indicador de escorrentía

I_{CH} es el valor normalizado del indicador de conectividad hidrográfica

I_K es el valor normalizado del indicador de erodabilidad

I_{CA} es el valor normalizado del indicador de calidad del agua

Una vez se calcularon los parámetros del IIVCD, los resultados fueron categorizados con base en el estudio realizado por Echeverri-Sánchez *et al.*, (2020), como se presenta en la Tabla 3-17.

Tabla 3-17. Categorización del IIVCD

Valor	Interpretación	Convención de color para zonificación
$IIVCD < 0.2$	Vulnerabilidad muy baja	
$0.2 \leq IIVCD < 0.4$	Vulnerabilidad baja	
$0.4 \leq IIVCD < 0.6$	Vulnerabilidad media	
$0.6 \leq IIVCD < 0.8$	Vulnerabilidad alta	
$0.8 \leq IIVCD \leq 1.0$	Vulnerabilidad muy alta	

3.3. Aplicación del IIVCD en un caso de estudio: cuenca del río Guachal

3.3.1. Parámetro indicador de declividad (I_s)

El cálculo del indicador de declividad en la zona de estudio fue realizado mediante el geoprocésamiento en ArcMap 10.5. A partir del Modelo Digital de Elevación del Terreno (DEM) se realizó un mapa de pendientes el cual fue reclasificado posteriormente de acuerdo con las categorías definidas en la metodología para el cálculo de este indicador. A la entidad reclasificada se le asignaron los valores normalizados de declividad y los valores correspondientes al indicador de declividad para el IIVCD como se presenta en la Figura 3-7.

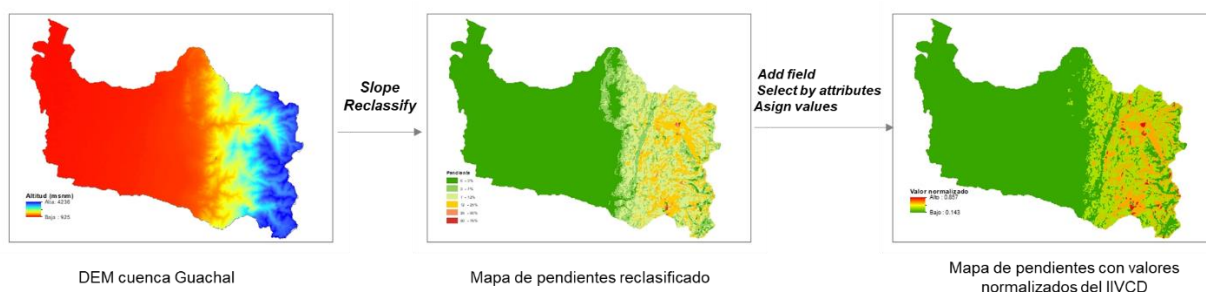


Figura 3-7. Cálculo del indicador de declividad para el IIVCD

En la Tabla 3-18 se presentan los resultados del parámetro declividad en función de las áreas de vulnerabilidad obtenidas. En estos resultados es posible observar que la mayor parte de la cuenca de estudio presenta una vulnerabilidad nula, con relación a la declividad. Esto se debe a que la cuenca del río Guachal es mayoritariamente plana con una zona montañosa hacia el oriente donde se presentan valores de vulnerabilidad media y alta en muy pequeñas proporciones (áreas).

Tabla 3-18. Áreas de la vulnerabilidad para el parámetro Declividad

Categoría IIVCD	Área (Ha)	Proporción
Nula	69,630.33	60%
Muy baja	12,078.68	10%
Baja	22,969.86	20%
Media	11,204.87	10%
Alta	428.51	0%
Muy alta	36.48	0%

En la Figura 3-8 se presenta el mapa de resultados del parámetro declividad obtenidos para la cuenca del río Guachal.

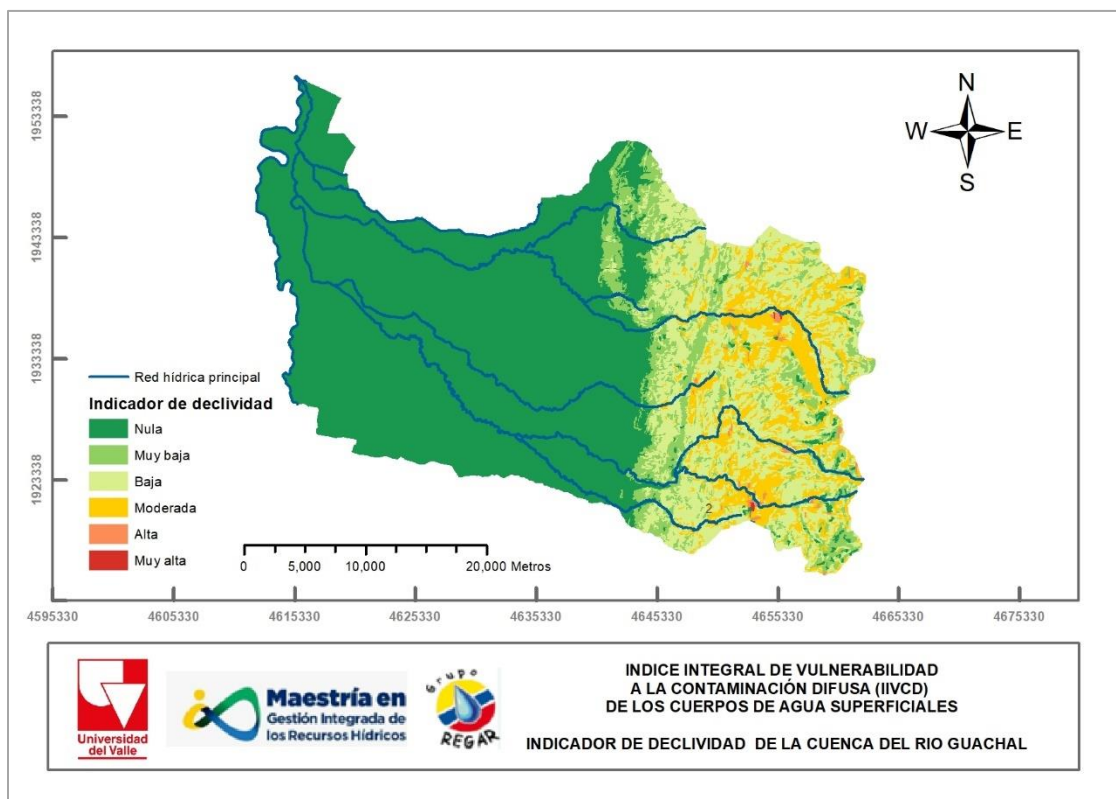


Figura 3-8. Indicador de Declividad IIVCD

3.3.2. Parámetro indicador de erosividad (I_R)

El cálculo del parámetro de erosividad se realizó procesando las isoyetas de precipitación media mensual multianual y las isoyetas de precipitación anual existentes para la cuenca del río Guachal. Con base en esta información se calculó el Índice Modificado de Fourier (IMF) a través de la herramienta álgebra de mapas en el software ArcMap 10.5 como se presenta en la Figura 3-9.

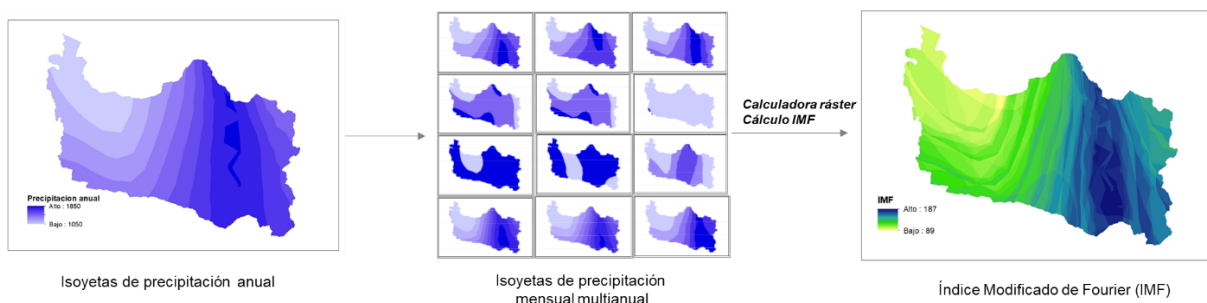


Figura 3-9. Cálculo del indicador de erosividad para el IIVCD

En la Tabla 3-19 se presentan los resultados del parámetro erosividad en función de las áreas de vulnerabilidad obtenidas. En estos resultados es posible observar que la erosividad se distribuye en tres categorías de vulnerabilidad; se presenta vulnerabilidad alta hacia la zona del pie de monte y la zona montañosa de la cuenca donde las precipitaciones

son mayores y una vulnerabilidad media hacia la zona plana de la cuenca donde los valores de vulnerabilidad son menores. Ahora bien, si se entiende la vulnerabilidad como el potencial que tiene la lluvia para causar erosión en el suelo, es consecuente que las zonas con mayores precipitaciones presenten mayor IMF y mayor vulnerabilidad.

Tabla 3-19. Áreas de la vulnerabilidad para el parámetro Erosividad

Categoría IIVCD	Área (Ha)	Proporción
Muy baja	0	0%
Baja	334.98	0%
Media	39,445.20	34%
Alta	46,067.80	40%
Muy alta	30,599.60	26%

En la Figura 3-9 se presenta el mapa de resultados del parámetro Erosividad obtenidos para la cuenca del río Guachal.

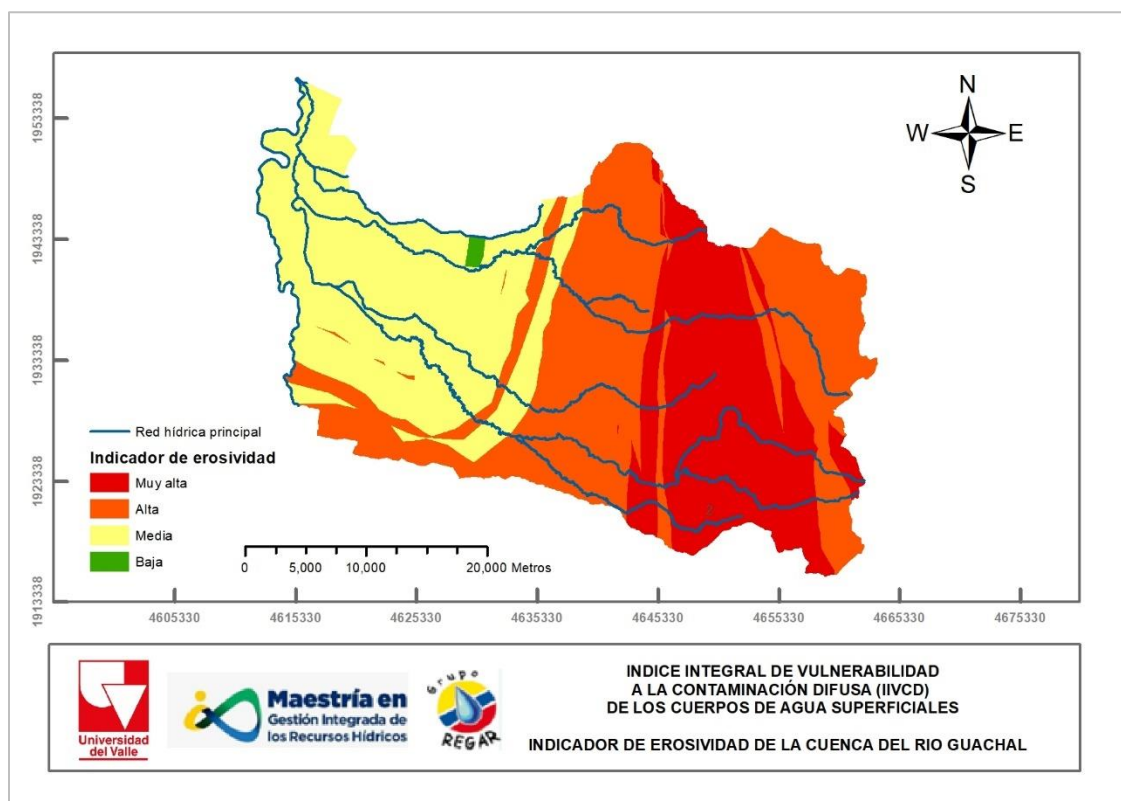


Figura 3-10. Indicador de Erosividad IIVCD

3.3.3. Parámetro indicador de escorrentía (I_{CN})

El cálculo del número de curva para la cuenca del río Guachal se realizó con base en la metodología de Chow (1994). Para ello se realizó una reclasificación de los suelos en los grupos hidrológicos A, B, C ó D de acuerdo con sus características. Paralelamente se realizó la reclasificación de las coberturas de la cuenca, según las categorías establecidas por este mismo autor.

Una vez generados estos insumos, se utilizó el método de los números primos para efectuar el geoprocésamiento. Según Univalle & CVC (2013), este es un método empleado generalmente para relacionar capas de información cuando se quiere obtener un único valor por cada combinación de ítems. Dada la singularidad de los números primos, el producto de ellos siempre dará un resultado diferente, condición que permite en el caso del número de curva asignar un único valor de CN a cada uno de los productos de las combinaciones entre las variables uso de suelo, tipo suelo y pendiente de acuerdo con las condiciones de la cuenca.

Tanto para los suelos como para las coberturas se generaron dos capas ráster con los valores de números primos, los cuales fueron procesados posteriormente en la herramienta calculadora ráster del software ArcMap 10.5, con el fin obtener el producto entre ambos datos distribuidos espacialmente. Una vez obtenido este resultado se realizó una reclasificación de acuerdo con los rangos recomendados por Univalle & CVC (2013), para la asignación del número de curva. Debido a que la pendiente es uno de los parámetros evaluados en el IIVCD, no se realizó corrección por pendiente a los CN obtenidos en este estudio. El cálculo realizado supone la condición más crítica del suelo (pobre) y condiciones antecedentes de humedad II. En la Tabla 3-20 se presentan los resultados de la reclasificación de los suelos en los grupos hidrológicos del suelo en la cuenca del río Guachal y el número primo asignado para su posterior geoprocésamiento.

Tabla 3-20. Reclasificación de los suelos en grupos hidrológicos

Litología	Características	Grupo hidrológico	Número primo asignado
Depósitos superficiales clásticos hidrogénicos (aluviones mixtos) cubiertos parcialmente por depósitos superficiales piroclásticos (ceniza volcánica)	Superficiales, texturas moderadamente finas y finas pedregosas, moderadamente drenados, fuerte a moderadamente ácidos, fertilidad alta; moderadamente profundos, texturas finas, bien drenados, fuerte a moderadamente ácidos, fertilidad moderada; muy	B	3.0

Índice Integral de Vulnerabilidad a la Contaminación Difusa de Origen Agrícola - IIVCD

Litología	Características	Grupo hidrológico	Número primo asignado
depósitos superficiales clásticos gravigénicos (coluviones heterométricos)	Muy superficiales a superficiales, texturas moderadamente gruesas, cascajosas y pedregosas y moderadamente finas, gravilosas, bien drenados, ligeramente ácidos, fertilidad muy alta; superficiales, texturas moderadamente finas gravilosas, bien drenados.	C	5.0
Rocas Ígneas volcánicas máficas, afaníticas y porfiríticas (diabasa) y en algunos sectores (basaltos)	Profundos a superficiales, texturas finas y moderadamente finas, bien drenados, muy fuerte a fuertemente ácidos, alta saturación de aluminio, fertilidad moderada; superficiales, texturas moderadamente finas y finas gravilosas, bien drenados, fue	C	5.0
Rocas Ígneas volcánicas máficas, afaníticas y porfiríticas (diabasa) y en algunos sectores (areniscas y calizas)	No hay desarrollo de suelos; muy superficiales, texturas moderadamente finas, bien drenados, ligeramente ácidos, fertilidad muy baja; muy profundos a moderadamente profundos, texturas moderadamente finas y finas.	C	5.0
Cuerpo de agua	Cuerpo de agua	C	5.0
Aluviones gruesos	Moderadamente profundos limitados por nivel freático, moderadamente drenados, neutros, fertilidad alta	C	5.0
Aluviones mixtos	Muy profundos, bien drenados, ligeramente alcalinos, fertilidad alta	C	5.0
Aluviones finos	Superficiales limitados por nivel freático, imperfectamente drenados, neutros, fertilidad muy alta	C	5.0
Aluviones gruesos	Muy profundos, bien drenados, ligeramente ácidos, fertilidad moderada	C	5.0
Aluviones medianos	Muy profundos, bien drenados, ligeramente ácidos, fertilidad moderada	C	5.0
Aluviones mixtos	Muy profundos, bien drenados, ligeramente alcalinos, fertilidad alta; muy profundos, bien drenados, neutros, fertilidad alta	C	5.0
depósitos superficiales clásticos piroclásticos no consolidados (ceniza volcánica) sobre rocas metamórficas de mediano y bajo grado (anfibolitas-esquistos) y en algunos sectores (turba ligeramente descompuesta)	Moderadamente profundos a superficiales, texturas moderadamente gruesas gravilosas, pedregosas, bien drenados, muy fuerte a fuertemente ácidos, fertilidad moderada	C	5.0

Índice Integral de Vulnerabilidad a la Contaminación Difusa de Origen Agrícola - IIVCD

Litología	Características	Grupo hidrológico	Número primo asignado
Rocas metamórficas dinamo-termales de bajo grado (esquistos) y/o en algunos sectores de mediano grado (neis)	Moderadamente profundos, texturas medias gravilosas, cascajosos, bien drenados, fuerte a moderadamente ácidos, fertilidad moderada; moderadamente profundos, texturas moderadamente finas y gruesas gravilosas, bien drenados, ligeramente	C	5.0
depósitos superficiales clásticos piroclásticos no consolidados (ceniza volcánica) y rocas metamórficas dinamo-termales de bajo grado (esquistos)	Muy profundos, texturas moderadamente finas, bien drenados, moderada a ligeramente ácidos, fertilidad alta; muy superficiales, texturas moderadamente gruesas gravilosas, bien drenados, moderada a ligeramente ácidos, fertilidad alta	C	5.0
depósitos superficiales clásticos hidrogénicos (aluviones mixtos)	superficiales a muy superficiales, texturas medias gravilosas, bien drenados, moderada a ligeramente ácidos, fertilidad alta; muy superficiales y superficiales, texturas moderadamente gruesas y gruesas, bien drenados, ligeramente ácidos.	C	5.0
Coluviones heterométricos	Moderadamente profundos limitados por fragmentos de roca, bien drenados, ligeramente ácidos, fertilidad moderada	C	5.0
Aluviones gruesos	Profundos, bien drenados, neutros, fertilidad alta	C	5.0
depósitos superficiales clásticos piroclásticos no consolidados (ceniza volcánica) sobre rocas metamórficas dinamo-termales de mediano grado (anfíbolitas)	Profundos, texturas moderada mente finas, bien drenados, muy fuerte a moderadamente ácidos, alta saturación de aluminio, fertilidad moderada; profundos, texturas moderadamente gruesas, moderada a bien drenados, moderada a ligeramente ácidos.	C	5.0
Rocas Ígneas volcánicas máficas, afaníticas y porfiríticas (diabasas) y en algunos sectores (areniscas y calizas)	Muy superficiales, texturas moderadamente finas, bien drenados, ligeramente ácidos, fertilidad muy baja; muy profundos a moderadamente profundos, texturas moderadamente finas y finas, bien drenados, muy fuerte a ligeramente ácidos, fertilidad baja;	C	5.0
depósitos superficiales clásticos piroclásticos no consolidados (ceniza volcánica) y rocas Ígneas volcánicas máficas, afaníticas y porfiríticas (diabasas)	Profundos, texturas finas y moderadamente finas, bien drenados, ligeramente ácidos, fertilidad alta; moderadamente profundos, texturas moderadamente gruesas a moderadamente finas, bien drenados, moderada a ligeramente ácidos, fertilidad alta; muy	C	5.0

Índice Integral de Vulnerabilidad a la Contaminación Difusa de Origen Agrícola - IIVCD

Litología	Características	Grupo hidrológico	Número primo asignado
Rocas metamórficas de bajo grado (esquistos) y/o rocas (cuarzodiorita), cubiertas parcialmente por depósitos piroclásticos de ceniza volcánica	N/A	C	5.0
depósitos superficiales clásticos piroclásticos no consolidados (ceniza volcánica) y/o rocas metamórficas de bajo grado (esquistos) y en algunos sectores (diabasas)	Moderadamente profundos a superficiales, texturas moderadamente gruesas gravillosas, pedregosas, bien drenados, muy fuerte a fuertemente ácidos, fertilidad moderada; No hay desarrollo de suelos	C	5.0
depósitos superficiales clásticos gravigénicos (coluviones heterométricos)	Muy superficiales, texturas moderadamente finas gravillosas, imperfecta a pobremente drenados, moderada a ligeramente ácidos, fertilidad alta; moderadamente profundos a profundos, texturas moderadamente finas, imperfectamente drenados, ligeramente ácidos	B	3.0
depósitos superficiales clásticos piroclásticos no consolidados (ceniza volcánica) y rocas metamórficas (esquistos) y en algunos sectores rocas ígneas plutónicas (cuarzodioritas)	Moderadamente profundos, texturas moderadamente finas a moderadamente gruesas, bien drenados, fuerte a moderadamente ácidos, fertilidad moderada; muy superficiales a superficiales, texturas moderadamente gruesas, cascajosas, pedregosas, excesivamente ácidos	B	3.0
Aluviones finos	Superficiales limitados por nivel freático, imperfectamente drenados, ligeramente alcalinos, fertilidad moderada	C	5.0
Coluviones heterométricos	Moderadamente profundos limitados por fragmentos de roca, moderadamente drenados, ligeramente ácidos, fertilidad muy alta	C	5.0
Aluviones muy finos	Muy superficiales limitados por nivel freático, pobremente drenados, moderadamente ácidos, fertilidad alta	C	5.0
Aluviones mixtos	Muy profundos, bien drenados, neutros, fertilidad alta	C	5.0
Aluviones medianos	Muy superficiales limitados por saturación de sodio mayor de 15%, moderadamente drenados, fuertemente alcalinos, fertilidad muy baja	C	5.0
Coluviones heterométricos	Superficiales limitados por fragmentos de roca, bien drenados, neutros, fertilidad alta	C	5.0

Índice Integral de Vulnerabilidad a la Contaminación Difusa de Origen Agrícola - IIVCD

Litología	Características	Grupo hidrológico	Número primo asignado
Aluviones gruesos	Profundos, bien drenados, ligeramente ácidos, fertilidad moderada; moderadamente profundos limitados por nivel freático, moderadamente drenados, neutros, fertilidad alta	C	5.0
Aluviones mixtos	Profundos, bien drenados, neutros, fertilidad muy alta	C	5.0
Aluviones mixtos	Muy profundos, bien drenados, ligeramente ácidos, fertilidad moderada; muy profundos, bien drenados, ligeramente alcalinos, fertilidad alta	C	5.0
Aluviones mixtos	Moderadamente profundos limitados por nivel freático, moderadamente drenados, ligeramente ácidos, fertilidad alta	C	5.0
Aluviones gruesos	Muy profundos, bien drenados, ligeramente ácidos, fertilidad alta	C	5.0
Aluviones medianos	Moderadamente profundos limitados por nivel freático, moderadamente drenados, moderadamente ácidos, fertilidad alta	C	5.0
Coluviones heterométricos	Muy superficiales limitados por fragmentos de roca, moderadamente drenados, moderadamente ácidos, fertilidad alta	C	5.0
Coluviones heterométricos y aluviones mixtos	Superficiales limitados por fragmentos de roca, bien drenados, neutros, fertilidad alta; moderadamente profundos limitados por fragmentos de roca, moderadamente drenados, ligeramente ácidos, fertilidad alta	C	5.0
Aluviones medianos	Profundos, bien drenados, neutros, fertilidad alta	C	5.0
Aluviones gruesos	Moderadamente profundos limitados por nivel freático, moderadamente drenados, ligeramente alcalinos a neutros, fertilidad moderada	C	5.0
Coluviones heterométricos	Muy superficiales limitados por fragmentos de roca, bien drenados, moderadamente ácidos, fertilidad alta; superficiales limitados por fragmentos de roca, bien drenados, neutros, fertilidad alta	C	5.0
Aluviones mixtos	Superficiales limitados por nivel freático, imperfectamente drenados, neutros, fertilidad muy alta; profundos, bien drenados, neutros, fertilidad muy alta	C	5.0
Aluviones medianos	Profundos, bien drenados, moderadamente ácidos, fertilidad alta	C	5.0

Índice Integral de Vulnerabilidad a la Contaminación Difusa de Origen Agrícola - IIVCD

Litología	Características	Grupo hidrológico	Número primo asignado
Aluviones finos	Superficiales limitados por nivel freático, imperfectamente drenados, neutros, fertilidad muy alta; moderadamente drenados, ligeramente alcalinos, fertilidad muy baja	C	5.0
Coluviones heterométricos	Muy superficiales limitados por fragmentos de roca, bien drenados, moderadamente ácidos, fertilidad alta	C	5.0
Aluviones finos	Muy superficiales, moderadamente drenados ligeramente alcalinos, fertilidad muy baja	C	5.0
Aluviones finos y coluviones heterométricos	Profundos, bien drenados, ligeramente ácidos, fertilidad muy alta; moderadamente profundos limitados por fragmentos de roca, bien drenados, ligeramente ácidos, fertilidad alta	C	5.0
Aluviones medianos	Moderadamente profundos limitados por nivel freático, moderadamente drenados, neutros, fertilidad muy alta	C	5.0
Coluviones heterométricos y aluviones mixtos	Moderadamente profundos limitados por fragmentos de roca, moderadamente drenados, ligeramente ácidos, fertilidad muy alta; moderadamente profundos limitados por fragmentos de roca, bien drenados, ligeramente ácidos, fertilidad alta	C	5.0
Aluviones gruesos	Moderadamente profundos limitados por nivel freático, moderadamente drenados, neutros a fuertemente alcalinos, fertilidad moderada	C	5.0
Aluviones finos	Profundos, bien drenados, ligeramente ácidos, fertilidad muy alta	C	5.0
Aluviones mixtos	Profundos, bien drenados, ligeramente ácidos, fertilidad alta	C	5.0
Aluviones muy finos	Muy superficiales limitados por nivel freático y saturación de sodio mayor de 15%, pobremente drenados, fuertemente alcalinos, fertilidad muy baja	C	5.0
Aluviones gruesos	Moderadamente profundos limitados por nivel freático, moderadamente drenados, neutros, fertilidad muy alta; moderadamente profundos limitados por nivel freático, moderadamente drenados, neutros a fuertemente alcalinos, fertilidad moderada	C	5.0

Índice Integral de Vulnerabilidad a la Contaminación Difusa de Origen Agrícola - IIVCD

Litología	Características	Grupo hidrológico	Número primo asignado
Aluviones medianos	Profundos, bien drenados, neutros, fertilidad alta; moderadamente profundos limitados por nivel freático, moderadamente drenados, neutros, fertilidad muy alta	C	5.0
Aluviones mixtos	Moderadamente profundos limitados por nivel freático, moderadamente drenados, ligeramente ácidos, fertilidad muy alta	C	5.0
Coluviones heterométricos	Superficiales limitados por fragmentos de roca, bien drenados, ligeramente ácidos, fertilidad alta	C	5.0
Aluviones gruesos y coluviones heterométricos	Superficiales limitados por fragmentos de roca, excesivamente drenados, neutros, fertilidad moderada	C	5.0
Aluviones gruesos	Muy profundos, bien drenados, ligeramente ácidos, fertilidad alta; profundos, bien drenados, neutros, fertilidad alta	C	5.0
Aluviones medianos	Moderadamente profundos limitados por nivel freático, moderadamente drenados, neutros, fertilidad alta	C	5.0
Aluviones mixtos	Profundos, bien drenados, neutros, fertilidad alta; moderadamente profundos limitados por nivel freático, moderadamente drenados, ligeramente ácidos, fertilidad alta	C	5.0
Rocas sedimentarias clásticas arenosas (areniscas y conglomerados) sobre limo-arcillosas (limolitas)	Muy superficiales a superficiales, texturas moderadamente gruesas gravilosas, bien a excesivamente drenados, fuertemente ácidos, fertilidad moderada; No hay desarrollo de suelos; moderadamente profundos, texturas finas a moderadamente gruesas, bien	B	3.0
Zona urbana	Zona urbana	C	5.0

En la Tabla 3-21 se presenta la reclasificación de las coberturas de la cuenca Guachal, realizada con base en las categorías recomendadas por Chow (1994) y Univalle & CVC (2013) para el cálculo del número de curva e índice de escurrimiento de la cuenca del río Guachal.

Tabla 3-21. Reclasificación de las coberturas

Cobertura 1:25.000	Cobertura reclasificada	Número primo asignado
Ríos	Zonas impermeables	359
Pasto cultivado	Pastos o pastizales	163
Caña de azúcar	Cultivos permanentes	191
Otras superficies artificiales con construcción	Tejido Urbano	293

Índice Integral de Vulnerabilidad a la Contaminación Difusa de Origen Agrícola - IIVCD

Cobertura 1:25.000	Cobertura reclasificada	Número primo asignado
Cultivos ornamentales en invernadero	Mosaico de cultivos con prados o praderas	151
Zonas urbanas continuas	Zonas impermeables	359
Misceláneo de pastos y cultivos	Mosaico de cultivos con prados o praderas	151
Zonas urbanas discontinuas	Zonas impermeables	359
Pasto cultivado arbolado	Pastos o pastizales	163
Pasto cultivado enmalezado	Pastos o pastizales	163
Bosque de guadua	Bosques	397
Habichuela	Mosaico de cultivos con prados o praderas	151
Canal	Zonas impermeables	359
Otras asociaciones de cultivos	Mosaico de cultivos con prados o praderas	151
Vegetación secundaria o transición	Bosques	397
Otras superficies pantanosas	Zonas impermeables	359
Otras superficies artificiales sin construcción	Tejido Urbano	293
Arbustal y matorral denso bajo de tierra firme	Arbustos y matorrales	193
Áreas de cultivo con suelo desnudo	Mosaico de cultivos con prados o praderas	151
Tomate-Habichuela	Mosaico de cultivos con prados o praderas	151
Maíz	Mosaico de cultivos con prados o praderas	151
Otros cultivos arbustivos plantados abiertos	Mosaico de cultivos con prados o praderas	151
Áreas naturales desnudas	Barbecho, tierras desnudas o degradadas	11
Mango	Mosaico de cultivos con prados o praderas	151
Arbustal y matorral abierto alto de tierra firme	Arbustos y matorrales	193
Misceláneo de cultivos y espacios naturales	Mosaico de cultivos con prados o praderas	151
Estanques artificiales	Zonas impermeables	359
Bosque mixto fragmentado con vegetación natural	Bosques	397
Arbustal y matorral denso bajo inundable	Arbustos y matorrales	193
Bosque mixto fragmentado con pastos y cultivos	Bosques	397
Piña	Mosaico de cultivos con prados o praderas	151
Otros cultivos arbóreos plantados densos	Mosaico de cultivos con prados o praderas	151
Lagunas	Zonas impermeables	359
Misceláneo de Cítrico	Mosaico de cultivos con prados o praderas	151
Bosque mixto denso alto de tierra firme	Bosques	397
Soya	Mosaico de cultivos con prados o praderas	151
Embalse	Zonas impermeables	359
Café	Cultivos permanentes	191
Café-Plátano	Cultivos permanentes	191
Café-Otros arbóreos	Cultivos permanentes	191
Bosque mixto abierto bajo de tierra firme	Bosques	397
Bosque mixto abierto alto de tierra firme	Bosques	397
Pasto de corte	Pastos o pastizales	163
Eucalipto	Cultivos agrícolas leñosos	181

Índice Integral de Vulnerabilidad a la Contaminación Difusa de Origen Agrícola - IIVCD

Cobertura 1:25.000	Cobertura reclasificada	Número primo asignado
Bosque mixto denso bajo de tierra firme	Bosques	397
Herbazal natural denso no arbolado	Herbáceas con algo de matorral	379
Herbazal natural abierto rocoso	Herbáceas con algo de matorral	379
Áreas de deslizamientos	Barbecho, tierras desnudas o degradadas	11
Herbazal natural denso con arbustos	Herbáceas con algo de matorral	379
Arbustal y matorral abierto bajo de tierra firme	Arbustos y matorrales	193
Afloramientos rocosos	Zonas impermeables, ríos lagunas, cuerpos de agua	359
Arbustal y matorral abierto bajo inundable	Arbustos y matorrales	193
Otros cuerpos de agua	Zonas impermeables	359
Otros Cultivos confinados	Mosaico de cultivos con prados o praderas	151
Superficies de inundación temporal	Zonas impermeables	359
Arbustal y matorral denso alto de tierra firme	Arbustos y matorrales	193
Misceláneo de árboles frutales	Mosaico de cultivos con prados o praderas	151
Teca	Mosaico de cultivos con prados o praderas	151
Arenal	Barbecho, tierras desnudas o degradadas	11
Pepino	Mosaico de cultivos con prados o praderas	151
Limón	Mosaico de cultivos con prados o praderas	151
Plátano	Mosaico de cultivos con prados o praderas	151
Otros cultivos herbáceos plantados densos	Mosaico de cultivos con prados o praderas	151
Turberas	Zonas impermeables	359
Tomate-Frijol	Mosaico de cultivos con prados o praderas	151
Cítricos-Plátano	Mosaico de cultivos con prados o praderas	151
Bosque mixto relictual	Bosques	397
Herbazal natural denso arbolado	Herbáceas con algo de matorral	379
Arbustal y matorral abierto bajo paramuno	Arbustos y matorrales	193
Frijol	Mosaico de cultivos con prados o praderas	151
Cacao	Cultivos permanentes	191
Vid	Mosaico de cultivos con prados o praderas	151
Yuca-Plátano	Mosaico de cultivos con prados o praderas	151
Café -Otros cultivos	Cultivos permanentes	191
Tomate	Mosaico de cultivos con prados o praderas	151
Papayo	Mosaico de cultivos con prados o praderas	151
Maracuyá	Mosaico de cultivos con prados o praderas	151
Pino cosechado	Cultivos agrícolas leñosos	181
Aguacate	Cultivos permanentes	191
Naranja	Mosaico de cultivos con prados o praderas	151
Zapote	Mosaico de cultivos con prados o praderas	151
Arveja	Cultivo de leguminosas o rotaciones	131

Una vez se obtuvieron las coberturas y los suelos reclasificados, se realizó el cálculo del número de curva a partir de la multiplicación de las capas ráster de suelos y coberturas con

base en el campo de número primo asignado. Como producto se obtuvo una capa ráster con el producto correspondiente a un único número primo por cada registro de las capas operadas. Esta capa fue reclasificada con base en las tablas recomendadas por Univalle & CVC (2013), que relacionan el número primo obtenido con el número de curva correspondiente. Esta información fue procesada en el software ArcMap 10.5 y la metodología se presenta en la Figura 3-11.

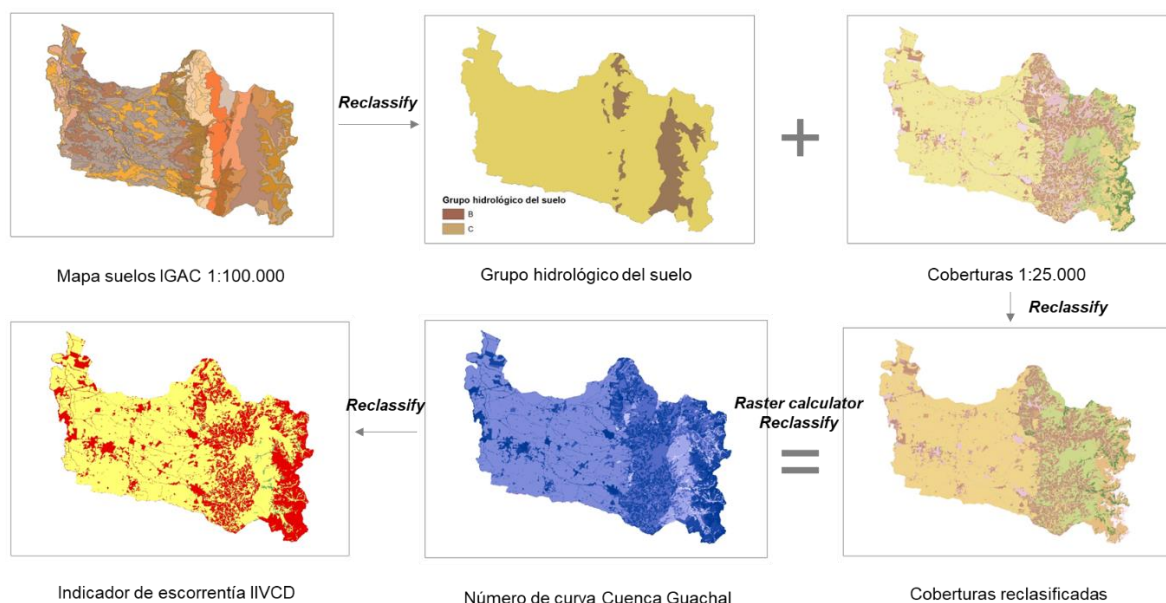


Figura 3-11. Cálculo del indicador de escorrentía para el IIVCD

En la Tabla 3-22 se presentan los resultados del parámetro escorrentía en función de las áreas de vulnerabilidad obtenidas. Estos resultados indican que la mayor proporción de la cuenca se encuentra en una condición semipermeable. Esto se debe principalmente a que el área de estudio es una zona cuyo uso del suelo es predominantemente agrícola con algunas áreas urbanizadas discontinuas. Los mayores números de curva, que representan las zonas más impermeables de la cuenca y donde se generaría más escorrentía, se dan en las áreas de cuerpos de agua, afloramientos rocosos en la parte montañosa de la cuenca y tejidos urbanos discontinuos. La determinación del número de curva, como indicador de la permeabilidad de la cuenca o de su capacidad para generar escurrimiento, es un parámetro relevante toda vez que son los flujos de agua superficial quienes favorecen el transporte de contaminantes hacia los cuerpos de agua.

Tabla 3-22. Áreas vulnerabilidad para el parámetro Escorrentía

Categoría IIVCD	Área (Ha)	Proporción
Baja	644.45	0.55%
Media	83,289.37	71.53%
Alta	32,511.40	27.92%

En la Figura 3-12 se presenta el mapa de resultados del número de curva obtenido para la para la cuenca del río Guachal.

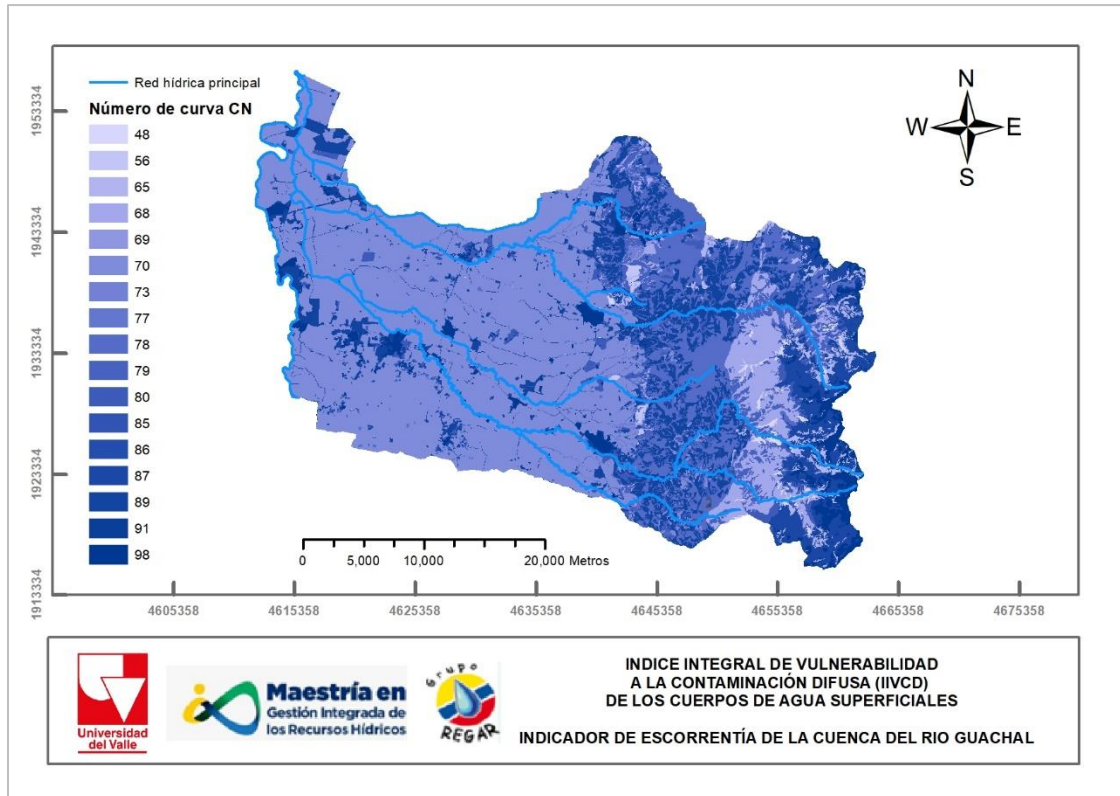


Figura 3-12. Número de curva cuenca del río Guachal

En la Figura 3-13 se presenta el mapa de resultados del parámetro escorrentía obtenidos para la cuenca del río Guachal. Según la categorización diseñada para este indicador, las zonas con mayor número de curva, es decir las zonas más impermeables, representan mayor vulnerabilidad toda vez que son áreas más propensas a generar escurrimiento superficial y, a través de este, transportar contaminantes a los cuerpos de agua.

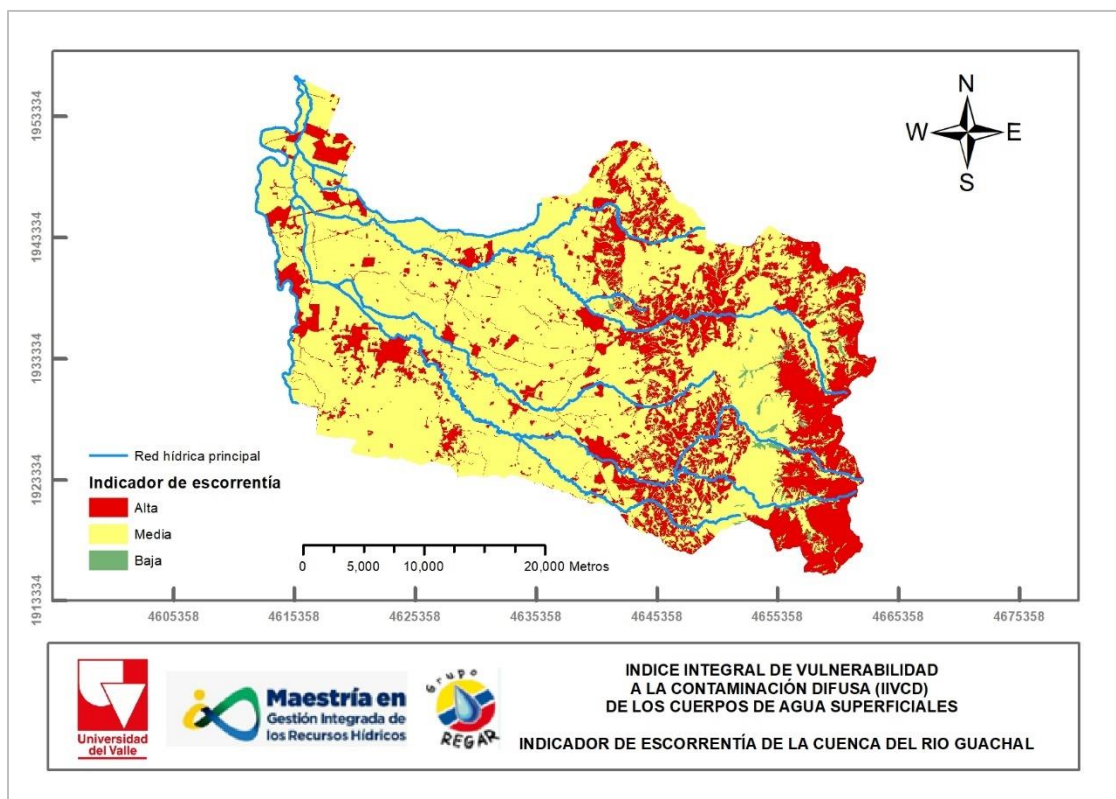


Figura 3-13. Indicador de Escorrentía IIVCD

3.3.4. Parámetro indicador de conectividad hidrográfica (I_{CH})

Para el cálculo del indicador de conectividad hidrográfica se realizó un análisis de las coberturas existentes en cada una de las distancias definidas en el índice de vulnerabilidad del Echeverri-Sánchez *et al.*, (2020). Para este análisis se generaron *buffers* o áreas aferentes a los cuerpos de agua de la cuenca, a partir de la red hídrica principal y en distancias de 500, 2000, 5000 y mayores a 5000 metros. Para cada uno de estos *buffers* se realizó el análisis detallado de las coberturas existentes, que consistió en clasificar diferenciadamente aquellas coberturas que son atenuantes de la vulnerabilidad y aquellas que promueven esta condición. Según Grimene *et al.*, (2022) las coberturas como cuerpos de agua, humedales, lagunas, estanques y bosques contribuyen a la protección de los suelos y mitigan el riesgo de erosión, mejoran su estructura y contribuyen a la protección del agua superficial reduciendo consecuentemente los riesgos de contaminación difusa.

En este sentido, para cada área aferente evaluada, se realizó una reclasificación asignando mayores valores de vulnerabilidad a las coberturas asociadas a los cultivos y menores valores de vulnerabilidad a las coberturas que atenúan la vulnerabilidad a la contaminación difusa. La propuesta de reclasificación de estas coberturas que fue empleada en el IIVCD de la cuenca del río Guachal se presenta en la Tabla 3-23.

Tabla 3-23. Reclasificación de las coberturas para cada una de las áreas aferentes a los cuerpos de agua de la cuenca del río Guachal

Cobertura	Valor normalizado			
	Distancia ≤500 m	Distancia entre 500 y 2000 m	Distancia entre 2000 y 5000 m	Distancia mayor a 5000 m
Afloramientos rocosos	1.00	0.75	0.50	0.25
Aguacate	1.00	0.75	0.50	0.25
Arbustal y matorral abierto alto de tierra firme	0.75	0.50	0.25	0.25
Arbustal y matorral abierto bajo de tierra firme	0.75	0.50	0.25	0.25
Arbustal y matorral abierto bajo inundable	0.75	0.50	0.25	0.25
Arbustal y matorral abierto bajo paramuno	0.75	0.50	0.25	0.25
Arbustal y matorral denso alto de tierra firme	0.75	0.50	0.25	0.25
Arbustal y matorral denso bajo de tierra firme	0.75	0.50	0.25	0.25
Áreas de cultivo con suelo desnudo	1.00	0.75	0.50	0.25
Áreas de deslizamientos	1.00	0.75	0.50	0.25
Áreas naturales desnudas	1.00	0.75	0.50	0.25
Arenal	1.00	0.75	0.50	0.25
Arveja	1.00	0.75	0.50	0.25
Bosque de guadua	0.75	0.50	0.25	0.25
Bosque mixto abierto alto de tierra firme	0.75	0.50	0.25	0.25
Bosque mixto abierto bajo de tierra firme	0.75	0.50	0.25	0.25
Bosque mixto denso alto de tierra firme	0.75	0.50	0.25	0.25

Cobertura	Valor normalizado			
	Distancia ≤500 m	Distancia entre 500 y 2000 m	Distancia entre 2000 y 5000 m	Distancia mayor a 5000 m
Bosque mixto denso bajo de tierra firme	0.75	0.50	0.25	0.25
Bosque mixto fragmentado con pastos y cultivos	0.75	0.50	0.25	0.25
Bosque mixto fragmentado con vegetación natural	0.75	0.50	0.25	0.25
Cacao	1.00	0.75	0.50	0.25
Café	1.00	0.75	0.50	0.25
Café-Otros arbóreos	1.00	0.75	0.50	0.25
Café-Otros cultivos	1.00	0.75	0.50	0.25
Café - Plátano	1.00	0.75	0.50	0.25
Canal	1.00	0.75	0.50	0.25
Caña de azúcar	1.00	0.75	0.50	0.25
Cítricos -Plátano	1.00	0.75	0.50	0.25
Cultivos ornamentales en invernadero	1.00	0.75	0.50	0.25
Estanques artificiales	0.75	0.50	0.25	0.25
Eucalipto	1.00	0.75	0.50	0.25
Frijol	1.00	0.75	0.50	0.25
Habichuela	1.00	0.75	0.50	0.25
Herbazal natural abierto rocoso	0.75	0.50	0.25	0.25
Herbazal natural denso con arbustos	0.75	0.50	0.25	0.25
Herbazal natural denso no arbolado	0.75	0.50	0.25	0.25
Lagunas	0.75	0.50	0.25	0.25
Limón	1.00	0.75	0.50	0.25
Maíz	1.00	0.75	0.50	0.25
Mango	1.00	0.75	0.50	0.25
Misceláneo de árboles frutales	1.00	0.75	0.50	0.25
Misceláneo de críticos	1.00	0.75	0.50	0.25
Misceláneo de cultivos y espacios naturales	1.00	0.75	0.50	0.25

Cobertura	Valor normalizado			
	Distancia ≤500 m	Distancia entre 500 y 2000 m	Distancia entre 2000 y 5000 m	Distancia mayor a 5000 m
Misceláneo de pastos y cultivos	1.00	0.75	0.50	0.25
Naranja	1.00	0.75	0.50	0.25
Otras asociaciones de cultivos	1.00	0.75	0.50	0.25
Otras superficies artificiales con construcción	1.00	0.75	0.50	0.25
Otras superficies artificiales sin construcción	1.00	0.75	0.50	0.25
Otros cuerpos de agua	1.00	0.75	0.50	0.25
Otros cultivos arbóreos plantados densos	1.00	0.75	0.50	0.25
Otros cultivos arbustivos plantados abiertos	1.00	0.75	0.50	0.25
Otros Cultivos confinados	1.00	0.75	0.50	0.25
Otros cultivos herbáceos plantados densos	1.00	0.75	0.50	0.25
Pasto cultivado	1.00	0.75	0.50	0.25
Pasto cultivado arbolado	1.00	0.75	0.50	0.25
Pasto cultivado enmalezado	1.00	0.75	0.50	0.25
Pasto de corte	1.00	0.75	0.50	0.25
Pepino	1.00	0.75	0.50	0.25
Pina	1.00	0.75	0.50	0.25
Plátano	1.00	0.75	0.50	0.25
Ríos	1.00	0.75	0.50	0.25
Soya	1.00	0.75	0.50	0.25
Superficies de inundación temporal	1.00	0.75	0.50	0.25
Teca	1.00	0.75	0.50	0.25
Tomate	1.00	0.75	0.50	0.25
Tomate-Frijol	1.00	0.75	0.50	0.25

Cobertura	Valor normalizado			
	Distancia ≤500 m	Distancia entre 500 y 2000 m	Distancia entre 2000 y 5000 m	Distancia mayor a 5000 m
Tomate-Habichuela	1.00	0.75	0.50	0.25
Turberas	0.75	0.50	0.25	0.25
Vegetación secundaria o transición	0.75	0.50	0.25	0.25
Vid	1.00	0.75	0.50	0.25
Yuca-Plátano	1.00	0.75	0.50	0.25
Zonas urbanas continuas	1.00	0.75	0.50	0.25
Zonas urbanas discontinuas	1.00	0.75	0.50	0.25
Arbustal y matorral denso bajo inundable	0.75	0.50	0.25	0.25
Bosque mixto relictual	0.75	0.50	0.25	0.25
Café	1.00	0.75	0.50	0.25
Embalse	0.75	0.50	0.25	0.25
Maracuyá	1.00	0.75	0.50	0.25
Otras superficies pantanosas	1.00	0.75	0.50	0.25
Pino cosechado	1.00	0.75	0.50	0.25
Zapote	1.00	0.75	0.50	0.25
Misceláneo de pastos y cultivos	1.00	0.75	0.50	0.25
Misceláneo cultivos y espacios naturales	1.00	0.75	0.50	0.25
Herbazal natural denso arbolado	0.75	0.50	0.25	0.25
Papayo	1.00	0.75	0.50	0.25
Misceláneo Cítricos	1.00	0.75	0.50	0.25

El cálculo del indicador de conectividad hidrográfica se realizó en el software ArcMap 10.5 y la metodología se presenta en la Figura 3-14.

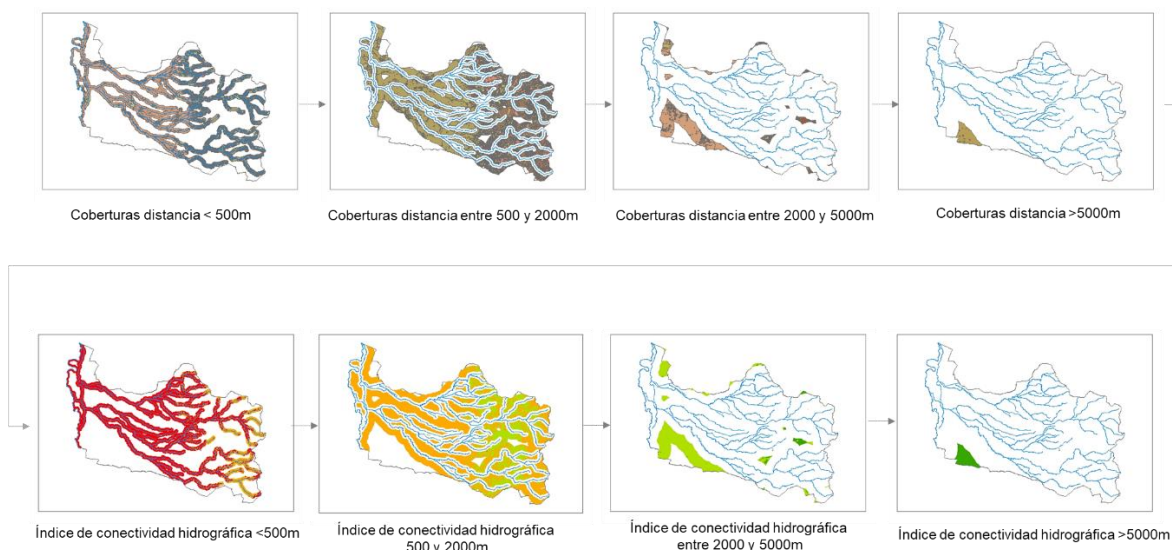


Figura 3-14. Cálculo del indicador de conectividad hidrográfica para el IIVCD

En la Tabla 3-24 se presentan los resultados del parámetro de conectividad hidrográfica en función de las áreas de vulnerabilidad obtenidas. Estos resultados indican que la mayor proporción de la cuenca se encuentra en vulnerabilidad alta y muy alta. Esto se debe principalmente por la existencia de cultivos muy cerca de los cuerpos de agua superficial. Esto indica que estos cuerpos de agua se encuentran desprovistos de coberturas protectoras como las rondas hídricas o franjas de protección lo cual exacerba la vulnerabilidad a la contaminación difusa. Los resultados de este parámetro evidencian que la mayor proporción de la cuenca se encuentra en un alto grado de conexión entre las fuentes generadoras de la amenaza (cultivos agrícolas) y el elemento expuesto (cuerpos de agua).

Tabla 3-24. Áreas vulnerabilidad para el parámetro Conectividad hidrográfica

Categoría IIVCD	Área (Ha)	Proporción
Baja	2,780.39	2%
Media	22,205.70	19%
Alta	50,884.13	44%
Muy alta	40,570.25	35%

En la Figura 3-15 se presenta el mapa de resultados del parámetro conectividad hidrográfica obtenido para la cuenca del río Guachal. En estos resultados se evidencia que la mayor proporción de coberturas que son consideradas atenuantes de la vulnerabilidad, en esta metodología, se encuentran hacia la zona montañosa de la cuenca y que, en la zona plana el uso es del suelo es más intensivo y homogéneo lo que ocasiona que la vulnerabilidad se vea simplificada a la clasificación de la distancia del cultivo a los cuerpos de agua, pues las coberturas diferentes a los cultivos con escasas.

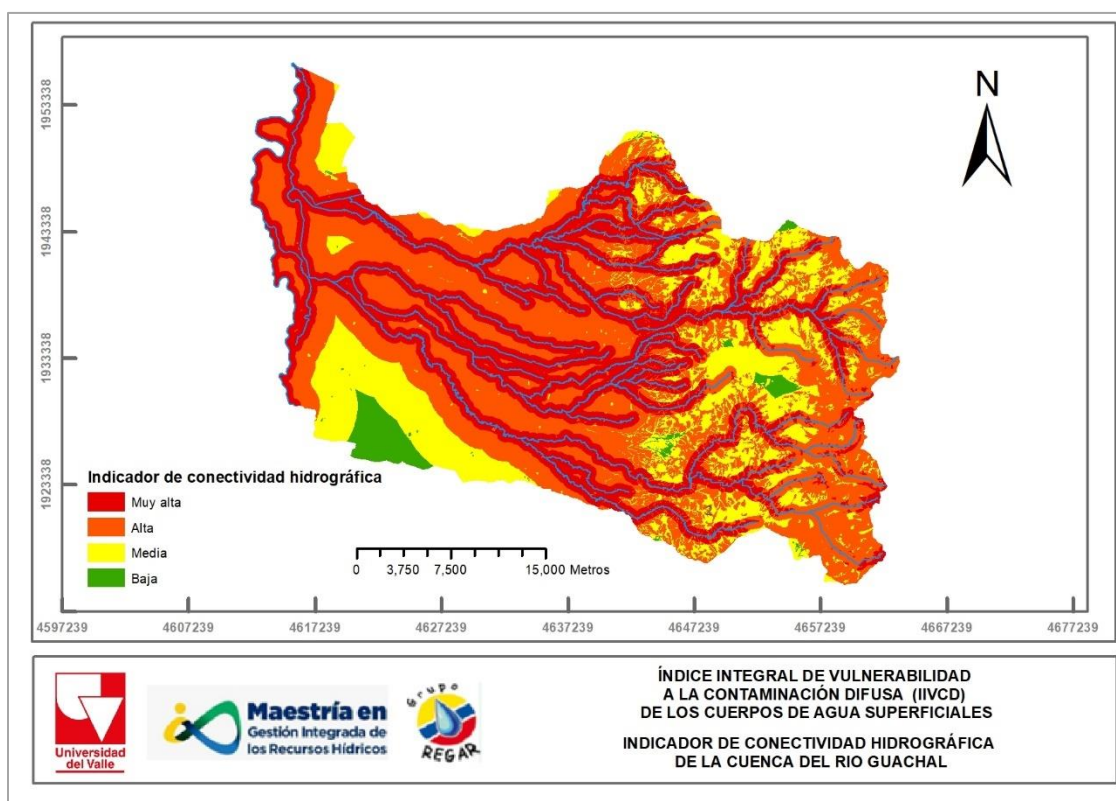


Figura 3-15. Indicador de Conectividad hidrográfica IIVCD

3.3.5. Parámetro indicador de erodabilidad (I_k)

El cálculo del parámetro de erodabilidad se realizó con base en el factor K asociado a las propiedades del suelo. Para ello se tomó como insumo el factor K determinado por la Corporación Autónoma Regional del Valle del Cauca (CVC) a partir del estudio general de suelos a escala 1:100.000, para la cuenca del río Guachal. Posteriormente se realizó una reclasificación a este insumo cartográfico asignando los valores normalizados de vulnerabilidad del IIVCD. Estos valores se presentan en la Tabla 3-25.

Tabla 3-25. Resultados del cálculo del factor K para el indicador de erodabilidad

Taxonomía suelo	Factor de erodabilidad (K)	Categoría de erodabilidad IIVCD	Valor normalizado de erodabilidad IIVCD
Humic Epiaquepts	0.00	Natural	0.13
Typic Haplustolls	0.00	Natural	0.13
Typic Dystrudepts	0.00	Natural	0.13
Typic Hapludans	0.36	Extremadamente severa	1.00
Lithic Ustorthents	0.00	Natural	0.13
Humic Dystrustepts	0.00	Natural	0.13
Chromic Udic Haplusterts	0.00	Natural	0.13
Udertic Haplustolls	0.00	Natural	0.13

Índice Integral de Vulnerabilidad a la Contaminación Difusa de Origen Agrícola - IIVCD

Taxonomía suelo	Factor de erodabilidad (K)	Categoría de erodabilidad IIVCD	Valor normalizado de erodabilidad IIVCD
Vertic Endoaquepts	0.00	Natural	0.13
Aeric Fluvaquepts	0.00	Natural	0.13
Fluventic Haplustolls	0.00	Natural	0.13
Aquertic Haplustepts	0.00	Natural	0.13
Fluventic Haplustepts	0.00	Natural	0.13
Cumulic Haplustolls	0.00	Natural	0.13
Udic Haplusterts	0.00	Natural	0.13
Udic Calciusterts	0.00	Natural	0.13
Entic Haplustolls	0.00	Natural	0.13
Fluvaquentic Haplustolls	0.00	Natural	0.13
Typic Ustifluvents	0.00	Natural	0.13
Vertic Haplustolls	0.00	Natural	0.13
Udifluventic Haplustolls	0.00	Natural	0.13
Pachic Haplustolls	0.00	Natural	0.13
Petrocalcic NatrustalFs	0.00	Natural	0.13
Sodic Calciusterts	0.00	Natural	0.13
Entic Hapludolls	0.00	Natural	0.13
Typic Hapludolls	0.00	Natural	0.13
Vertic Haplustepts	0.00	Natural	0.13
Vertic HaplustalFs	0.00	Natural	0.13
Typic Haplusterts	0.00	Natural	0.13
Typic Hapludands	0.00	Natural	0.13
Typic Fulvudands	0.18	Extremadamente severa	1.00
Typic Dystrustepts	0.00	Natural	0.13
Aquertic HaplustalFs	0.00	Natural	0.13
Typic Ustipsamments	0.00	Natural	0.13
Fluvaquentic Endoaquepts	0.00	Natural	0.13
Entic Udic Haplusterts	0.00	Natural	0.13
Typic Eutrudepts	0.00	Natural	0.13
Lithic Cryorthents	0.00	Natural	0.13
Aquertic HapludalFs	0.00	Natural	0.13
Typic Argiudolls	0.38	Extremadamente severa	1.00
Typic Argiustolls	0.00	Natural	0.13
Inceptic HaplustalFs	0.30	Extremadamente severa	1.00
Oxic Haplustepts	0.00	Natural	0.13
Udicfluventic Haplustepts	0.00	Natural	0.13
Oxic Dystrudepts	0.00	Natural	0.13
Typic HaplustalFs	0.00	Natural	0.13
Aquic Haplustepts	0.00	Natural	0.13
Typic Hydrudands	0.18	Extremadamente severa	1.00
Typic DurustalFs	0.00	Natural	0.13

El geoprocésamiento de los insumos cartográficos para la determinación del indicador de erodabilidad de la cuenca del río Guachal se presentan en la Figura 3-16.

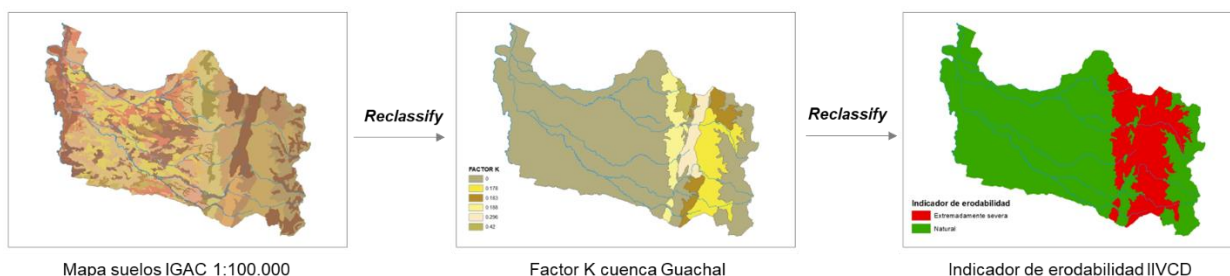


Figura 3-16. Cálculo del indicador de erodabilidad para el IIVCD

En la Tabla 3-26 se presentan los resultados del parámetro de erodabilidad en función de las áreas de vulnerabilidad obtenidas. En estos resultados se puede observar que la mayor proporción de la cuenca del río Guachal presenta una condición de erodabilidad natural, asociada a las características de textura y estructura de los suelos de la zona plana. Adicionalmente se observa que los suelos hacia la zona montañosa son más susceptibles a la erosión. Esta condición favorece los procesos de erosión y transporte de contaminantes desde las zonas de amenaza hacia los cuerpos de agua puesto que las pendientes y la precipitación, como dos fenómenos condicionantes de la erosión, son mayores hacia la zona de montaña de la cuenca de estudio.

Tabla 3-26. Áreas de vulnerabilidad para el parámetro erodabilidad

Categoría IIVCD	Área (Ha)	Proporción
Natural	89,967.28	77.37%
Muy baja	0	0.00%
Baja	0	0.00%
Media	0	0.00%
Alta	0	0.00%
Muy alta	0	0.00%
Severa	0	0.00%
Extremadamente Severa	26,307.43	22.63%

En la Figura 3-17 se presenta el mapa de resultados del parámetro erodabilidad obtenidos para la cuenca del río Guachal.

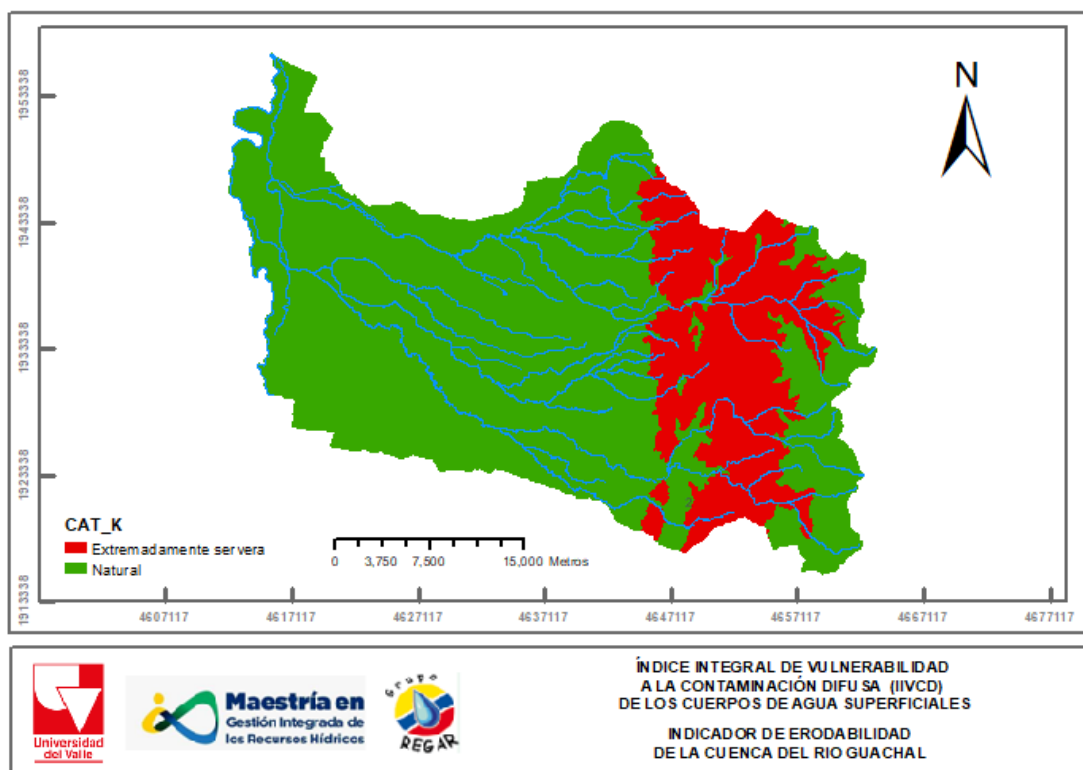


Figura 3-17. Indicador de erodabilidad IIVCD

3.3.6. Parámetro indicador de calidad del agua (ICA)

El cálculo del parámetro indicador de calidad del agua para la cuenca del río Guachal se realizó con base en las estaciones de monitoreo de calidad del agua pertenecientes a la red de monitoreo sistemático de la Corporación autónoma Regional del Valle del Cauca – CVC. En cada estación monitoreada, se realizó el cálculo del índice ICAUCA, de acuerdo con la metodología definida en este estudio. En la Tabla 3-27 se presenta los resultados del cálculo de este índice.

Tabla 3-27. Cálculo del ICAUCA cuenca del río Guachal

ID	ESTACIÓN	DBO ₅ (mg/l)	Temperatura	Oxígeno disuelto (mg/l)	%Saturación oxígeno	Turbiedad (UPC)	Sólidos totales	pH	Coliformes totales	Nitrógeno total	Fósforo total	Color verdadero	Sólidos suspendidos totales	ICAUCA / Valor normalizado	Categoría calidad ICAUCA
0	Rio Bolo - Puente Bolo San Isidro - vía a Candelaria	3.32	22.00	6.81	88.34	100.00	266.00	7.37	2400000	1.28	0.10	113.00	138.00	0.41	REGULAR
1	Rio Párraga - Puente vía Florida-Pradera	4.16	23.00	4.72	62.71	21.00	292.00	7.48	24000	2.92	0.43	9.14	26.00	0.50	REGULAR
2	Rio Frayle - Nacimiento El Pedregal	1.67	18.60	7.84	96.79	125.00	180.00	6.98	24000	0.60	0.96	160.00	143.00	0.43	REGULAR
3	Rio Frayle - Antes Desembocadura a rio Guachal, Recta Cali Palmira	7.95	22.80	4.48	58.90	600.00	994.00	7.09	2400000	2.39	0.96	237.00	885.00	0.24	MALA
4	Rio Bolo, Puente Palmira Pradera	2.09	20.60	7.54	95.92	45.00	180.00	7.44	430000	0.50	0.96	19.20	180.00	0.42	REGULAR
5	Rio Párraga - Antes Desembocadura a rio Frayle	3.30	22.50	4.86	63.50	60.00	214.00	7.17	93000	1.78	0.10	33.80	155.00	0.44	REGULAR
6	Rio Bolo - antes desembocadura a Frayle en Puente Recta Cali - Palmira	4.78	22.30	5.95	77.44	290.00	404.00	7.39	93000	2.05	0.20	303.00	359.00	0.33	MALA

Índice Integral de Vulnerabilidad a la Contaminación Difusa de Origen Agrícola - IIVCD

ID	ESTACIÓN	DBO ₅ (mg/l)	Temperatura	Oxígeno disuelto (mg/l)	%Saturación oxígeno	Turbiedad (UPC)	Sólidos totales	pH	Coliformes totales	Nitrógeno total	Fósforo total	Color verdadero	Sólidos suspendidos totales	ICAUCA / Valor normalizado	Categoría calidad ICAUCA
7	Rio Frayle - Puente Vía a Miranda	6.35	19.80	6.90	86.26	180.00	380.00	7.04	2400000	5.73	0.96	62.50	22.00	0.35	MALA
8	Rio Palmira - Antes desembocadura a rio Guachal	14.40	22.80	1.14	14.97	60.00	350.00	7.10	430000	2.88	0.10	376.00	48.00	0.26	MALA
9	Rio Párraga - Puente vía Candelaria-Florida	3.08	23.60	5.28	70.72	40.00	330.00	7.30	2400	1.82	0.21	79.20	26.00	0.57	REGULAR
10	Rio Frayle - limnígrafo CVC, caserío Brisas de Frayle	5.71	6.71	6.69	61.48	1000.00	3858.00	6.71	93000	2.75	0.96	390.00	2638.00	0.27	MALA
11	Rio Guachal - Antes Desembocadura a Rio Cauca	7.49	24.00	4.10	55.07	390.00	730.00	7.22	15000000	2.44	0.10	214.00	285.00	0.28	MALA
12	Rio Bolo - limnígrafo CVC - Los Minchos	2.07	19.00	7.79	100.05	33.00	160.00	7.05	2400	0.65	0.10	52.20	55.00	0.64	BUENA

En la Figura 3-18 se presenta la metodología empleada para el geoprocesamiento del indicador de calidad del agua. Se tomaron las áreas de drenaje de la cuenca del río Guachal y se ubicaron los puntos de monitoreo de calidad existentes en los puntos de cierre de dichas áreas. Los resultados del ICAUCA en estos puntos de cierre fueron extrapolados al área de drenaje aferente.

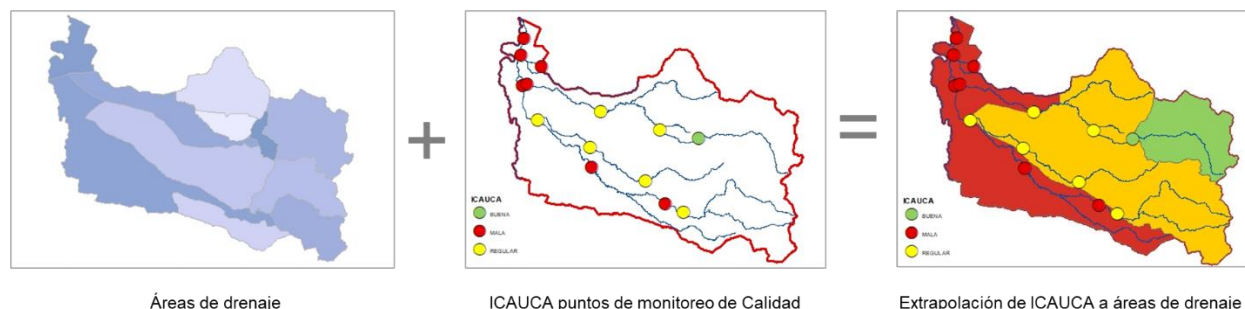


Figura 3-18. Cálculo del indicador de calidad del agua IIVCD

En la Tabla 3-28 se presentan los resultados del parámetro de calidad del agua en función de las áreas de vulnerabilidad obtenidas. Estos resultados indican que la mayor proporción de la cuenca del río Guachal tiene vulnerabilidad media en relación con la calidad del agua y corresponde a la cuenca media. La cuenca baja del río Guachal presenta una condición de vulnerabilidad alta y la zona asociada a la cuenca alta del río Bolo presenta vulnerabilidad baja. Esto se debe a que la calidad de estos cuerpos de agua se ve deteriorada desde aguas arriba y en su recorrido hasta el río Cauca, debido a intervenciones antrópicas como vertimientos puntuales de agua residual, contaminación difusa particularmente en las zonas desprovistas de vegetación riparia o rondas hídricas, extracciones de caudal para riego que disminuyen la capacidad de dilución de estos cuerpos de agua, aumentando su vulnerabilidad.

Tabla 3-28. Áreas de vulnerabilidad para el parámetro Calidad del agua

Categoría IIVCD	Área (Ha)	Proporción
Muy baja	0	0%
Baja	15,823.61	14%
Media	60,608.48	52%
Alta	40,014.81	34%
Muy alta	0	0%

Finalmente, en la Figura 3-19 se presentan los resultados de la espacialización del indicador de calidad del agua para la cuenca del río Guachal.

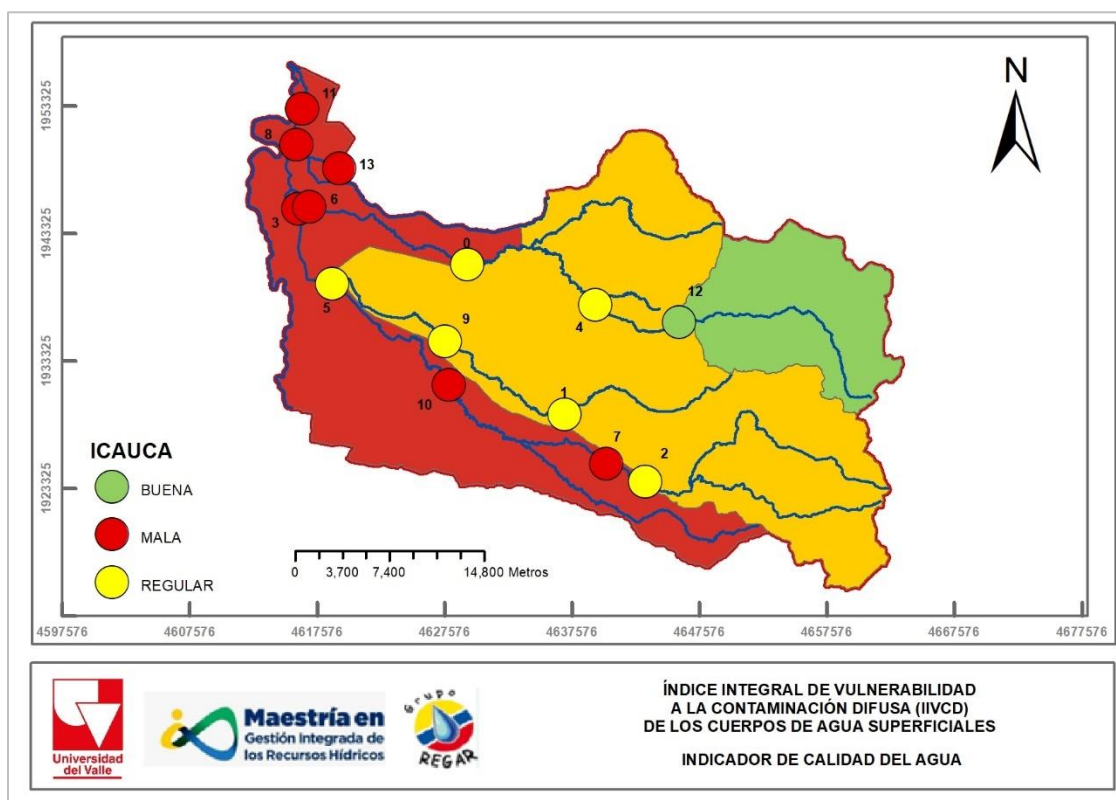


Figura 3-19. Indicador de calidad del agua IIVCD

3.3.7. Cálculo de la vulnerabilidad integral a partir del IIVCD en la cuenca del río Guachal

Para el cálculo de la vulnerabilidad integral o IIVCD se tomaron como insumos los resultados cartográficos (capas ráster) del cálculo de los seis parámetros del índice. Posteriormente, a partir del uso de la herramienta calculadora ráster del software ArcMap 10.5, se realizó la aplicación de la ecuación general del IIVCD para la obtención de una capa ráster con los valores del índice. En la Figura 3-20 se presentan los insumos cartográficos empleados para el cálculo del IIVCD y las herramientas empleadas para este propósito.

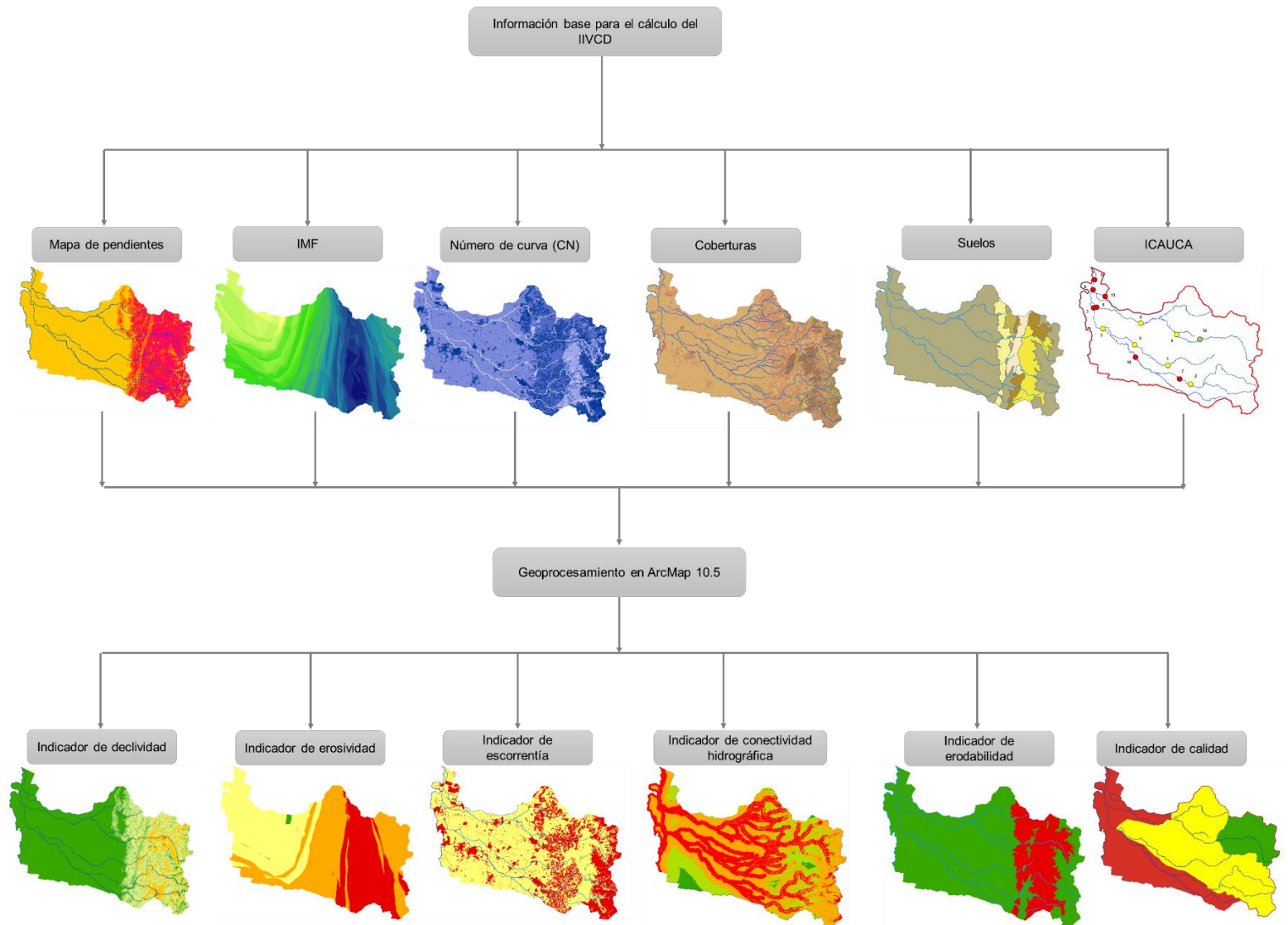


Figura 3-20. Elementos cartográficos empleados en la creación de los indicadores de vulnerabilidad

En la Figura 3-21 se presentan los resultados del cálculo del IIVCD para cada indicador y la vulnerabilidad integral. En estos gráficos es posible observar visualmente el resultado del IIVCD en proporción de áreas clasificadas en los distintos niveles de vulnerabilidad del índice. Adicionalmente es posible evidenciar la distribución de cada uno de los indicadores calculados a la vulnerabilidad integral. Estos resultados indican que el 63% de la cuenca del río Guachal se encuentra en vulnerabilidad media y que los parámetros que resultaron con áreas mayoritariamente de vulnerabilidad media son la escorrentía y calidad del agua. En este sentido, es posible establecer que el parámetro de escorrentía tuvo una mayor influencia en la vulnerabilidad integral, toda vez que su valor ponderado es mayor que el de calidad del agua.

El 33% del área de la cuenca del río Guachal fue clasificada como vulnerabilidad alta en el IIVCD. Este resultado fue influenciado principalmente por los parámetros de erosividad, conectividad hidrográfica y calidad del agua que tiene las mayores proporciones de áreas en vulnerabilidad alta. Sin embargo, los indicadores de erosividad y escorrentía representan el 38% de la ponderación del IIVCD motivo por el cual tuvieron mayor participación en el resultado final.

El 4% del área de la cuenca del río Guachal fue clasificada como vulnerabilidad muy alta en el IIVCD. Se observa que los parámetros que tuvieron áreas clasificadas de vulnerabilidad muy alta son la erosividad, conectividad hidrográfica y erodabilidad. Estos parámetros se encuentran ponderados en el IIVCD con aproximadamente el 50 % del total de los pesos del índice. Sin embargo, se observa que en el resultado de la vulnerabilidad integral representaron el 4% del área total en esta categoría. En los resultados es posible establecer que los parámetros más determinantes para la vulnerabilidad integral fueron la erosividad, escorrentía y calidad del agua. La declividad, pese a tener la ponderación más alta del índice, no fue determinante en los resultados finales debido a que sus resultados difieren significativamente de los resultados de los demás parámetros cuyo efecto agregado fue predominante.

Finalmente, se observa que la vulnerabilidad integral a la contaminación difusa de la cuenca del río Guachal se encuentra entre las categorías media, alta y muy alta como se observa en la Tabla 3-29.

Tabla 3-29. Áreas de vulnerabilidad para el IIVCD

Categoría IIVCD	Área (Ha)	Proporción
Media	72,930.93	62.71%
Alta	38,415.25	33.03%
Muy alta	4,944.12	4.25%

Índice Integral de Vulnerabilidad a la Contaminación Difusa de Origen Agrícola - IIVCD

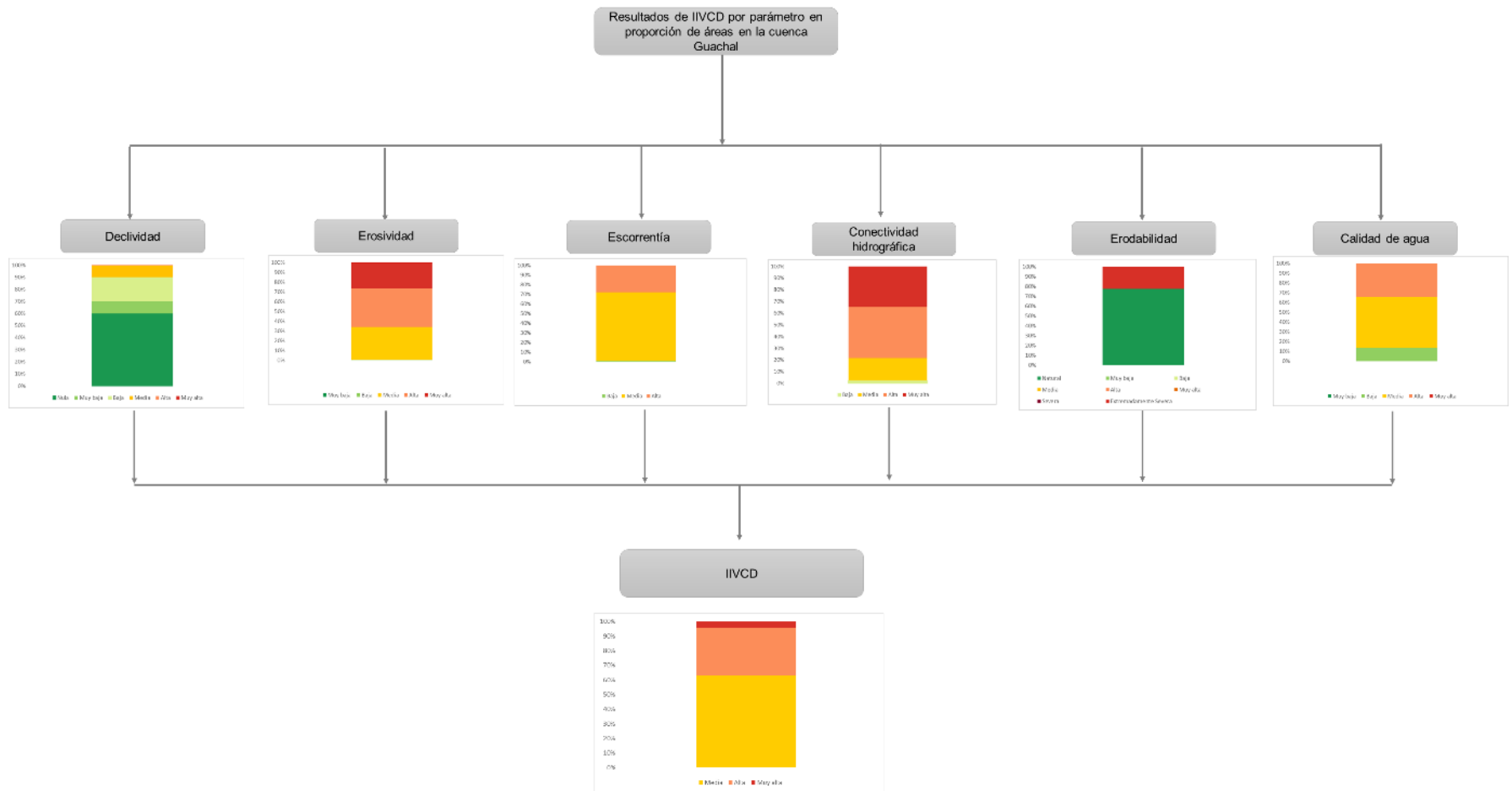


Figura 3-21. Resultados del cálculo del IIVCD por parámetro

Finalmente, en la Figura 3-19 se presentan los resultados de la espacialización del IIVCD para la cuenca del río Guachal.

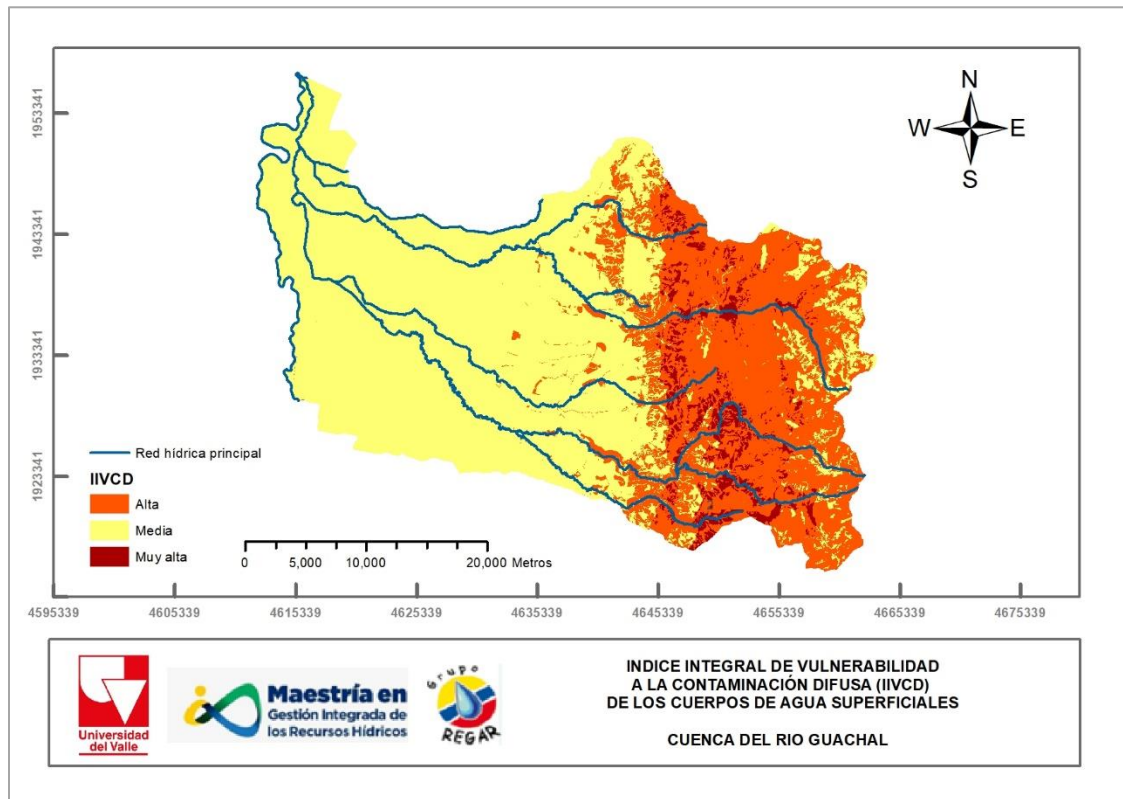


Figura 3-22. IIVCD para la cuenca del río Guachal

En comparación con el índice de vulnerabilidad desarrollado por Echeverri-Sánchez *et al.*, (2020) y aplicado por Cuéllar & Mosquera (2021), en la cuenca del río Guachal, indican que el 46 % del área de la cuenca se encuentra en vulnerabilidad baja mientras que el 53 % se encuentra en vulnerabilidad media y el 0.29% la vulnerabilidad alta. En el IIVCD no se presentaron áreas de vulnerabilidad baja ni muy baja. Esto puede deberse principalmente a que el índice de Echeverri-Sánchez *et al.*, (2020) contiene algunos parámetros que fueron excluidos del IIVCD, por ser conceptualmente considerados como componentes de la amenaza.

4. CONCLUSIONES

- Los parámetros seleccionados para la estimación de la vulnerabilidad a la contaminación difusa de origen agrícola, a partir del IIVCD diseñado, fueron producto de un proceso riguroso de revisión bibliográfica, consulta a expertos y análisis a partir de AHP y los resultados son consistentes con estudios preexistentes en esta cuenca. Por lo tanto, se considera que estos parámetros representan de forma adecuada las condiciones de vulnerabilidad del área de estudio.
- El método construido para la estimación de la vulnerabilidad de los cuerpos de agua superficiales a la contaminación difusa, denominado en este estudio como el IIVCD, es producto de una metodología rigurosa y objetiva que permitió diseñar una herramienta útil para estimar y zonificar la vulnerabilidad.
- La aplicación del IIVCD en la cuenca del río Guachal permitió validar el índice construido y analizar los resultados de este con referencia a estudios de vulnerabilidad preexistentes. De este análisis comparativo se encontró que el IIVCD es un índice que presenta resultados de mayor vulnerabilidad lo cual puede explicarse por el enfoque de este índice en la vulnerabilidad intrínseca excluyendo los factores asociados a la amenaza.
- El IIVCD es un índice de vulnerabilidad intrínseca que contiene parámetros condicionantes del riesgo que difícilmente pueden ser intervenidos en el marco de las medidas de reducción del riesgo de contaminación difusa, estos son; la erosividad, la erodabilidad, la declividad o pendiente. Sin embargo, la intervención en las coberturas de la cuenca tendría incidencia en la reducción de la vulnerabilidad de los parámetros de escorrentía, y conectividad hidrográfica. Asimismo, acciones para el mejoramiento de la calidad del agua tendría un efecto positivo en este parámetro.
- El objetivo de este trabajo fue desarrollar una metodología y marco operativo para evaluar la vulnerabilidad de los cuerpos de agua superficial a la contaminación difusa. Este trabajo representa un avance en el conocimiento conceptual y metodológico de las problemáticas asociadas a la contaminación difusa toda vez que este tipo de contaminación carece de metodologías aplicables para su cuantificación y medición directa y por ello, la gestión frente al fenómeno de contaminación difusa es incipiente. En este sentido, el IIVCD puede ser considerado como una herramienta para la zonificación y priorización de zonas donde se puedan implementar medidas de reducción de la vulnerabilidad.
- Los principales aportes de este trabajo son; la identificación y ponderación de los parámetros que controlan la vulnerabilidad de los cuerpos de agua superficiales a la contaminación difusa; la identificación de las zonas más vulnerables en la cuenca del río Guachal y la zonificación de la vulnerabilidad obtenida.
- Uno de los aportes inéditos del IIVCD para la estimación de la vulnerabilidad es la distinción de las coberturas atenuantes de la vulnerabilidad en el parámetro de

conectividad hidrográfica. Se recomienda la realización de un estudio con el fin de evaluar la capacidad de algunas coberturas para “atenuar” o “reducir” la vulnerabilidad a la contaminación difusa en función de su efecto en la retención, degradación y almacenamiento de contaminantes.

- El IIVCD es un índice que determina la vulnerabilidad intrínseca a la contaminación difusa de origen agrícola. En este sentido, para evaluar componentes como el riesgo se deberá realizar un análisis específico para la amenaza.
- El IIVCD puede ser empleado como herramienta para la evaluación de medidas de reducción de la vulnerabilidad y el riesgo de contaminación difusa de los cuerpos de agua superficial. Este índice puede ser calculado periódicamente con el fin de conocer la variación de la vulnerabilidad de acuerdo las medidas que se hayan implementado.
- Los Sistemas de Información Geográfica (SIG) representaron una herramienta esencial en el diseño y aplicación del IIVCD. Los SIG permiten procesar y obtener resultados y espacializarlos para comunicarlos de una forma eficaz a los formuladores de políticas y tomadores de decisiones en el marco de la Gestión Integrada de los Recursos Hídricos. Es una herramienta eficaz y útil.

5. RECOMENDACIONES

- El parámetro de calidad del agua, aunque fue el que obtuvo la menor ponderación entre los expertos, constituye el único parámetro de la vulnerabilidad que puede ser asociado con el concepto de resiliencia, toda vez que busca evaluar, de forma indirecta la capacidad de asimilación y autodepuración de los cuerpos de agua para recuperarse de la contaminación. Sin embargo, la modelación de calidad del agua constituye una herramienta más precisa para la determinación de esta capacidad y permite obtener los índices de calidad en cualquier punto de los cuerpos de agua y no únicamente en las estaciones de monitoreo. Se recomienda evaluar este parámetro utilizando como herramienta la modelación de calidad del agua para mejorar su precisión.
- Se recomienda, para una próxima aplicación del IIVCD, la unificación temporal de la información de entrada y el levantamiento de la información base para el cálculo del IIVCD en escalas espaciales homogéneas.
- El IIVCD, al ser un índice integral, considera de forma general parámetros asociados a distintas disciplinas como la geomorfología, química del agua, la hidrología y la agrología. En este sentido, se recomienda la posterior validación y ajustes de estos parámetros por especialistas es cada una de estas disciplinas con el propósito de mejorar la capacidad predictiva y la precisión de este índice.

6. REFERENCIAS

- Adger, W. N. (2006). Vulnerability. *Global Environmental Change*, 16(3), 268–281. <https://doi.org/10.1016/j.gloenvcha.2006.02.006>
- Adriana, L., Salazar, L., Felipe, A., & Quintero, C. (2015). *EROSIVIDAD DE LA LLUVIA EN LA REGIÓN CAFETERA DE QUINDÍO, COLOMBIA* (Vol. 66, Issue 1).
- Agyenim, J. B., & Gupta, J. (2012). IWRM and developing countries: Implementation challenges in Ghana. *Physics and Chemistry of the Earth*, 47–48, 46–57. <https://doi.org/10.1016/j.pce.2011.06.007>
- Albek, E. A., Göncü, S., Uygün, B., Albek, M., Avdan, Z. Y., & Güngör. (2019). Water quality monitoring with emphasis on estimation of point and diffuse pollution sources. *Global Nest Journal*, 21(2), 163–171. <https://doi.org/10.30955/gnj.002911>
- Andrés Ramírez-Ortiz, F., Hincapié-Gómez, Edgar, & Sadeghian-Khalajabadi, S. (2009). *ERODABILIDAD DE LOS SUELOS DE LA ZONA CENTRAL CAFETERA DEL DEPARTAMENTO DE CALDAS 1* (Vol. 60, Issue 1).
- Asgari, M. (n.d.). *A critical review on scale concept in GIS-based watershed management studies*. <https://doi.org/10.1007/s41324-020-00361-7>
- Bachoon, D. S., Markand, S., Otero, E., Perry, G., & Ramsubaugh, A. (2010). Assessment of non-point sources of fecal pollution in coastal waters of Puerto Rico and Trinidad. *Marine Pollution Bulletin*, 60(7), 1117–1121. <https://doi.org/10.1016/j.marpolbul.2010.04.020>
- Bandaragoda, D. J., & Babel, M. S. (2010). Institutional development for IWRM: An international perspective. *International Journal of River Basin Management*, 8(3–4), 215–224. <https://doi.org/10.1080/15715124.2010.496707>
- Briones, S. (n.d.). Conceptualizando riesgos y amenazas: una mirada al desarrollo terminológico y sustancial Conceptualizing Risks and Threats: A Look at the Terminological and Substantial Development. In *Revista Ensayos Militares* (Vol. 1).
- Candido, L. A., Coêlho, G. A. G., de Moraes, M. M. G. A., & Florêncio, L. (2022). Review of Decision Support Systems and Allocation Models for Integrated Water Resources Management Focusing on Joint Water Quantity-Quality. *Journal of Water Resources Planning and Management*, 148(2). [https://doi.org/10.1061/\(asce\)wr.1943-5452.0001496](https://doi.org/10.1061/(asce)wr.1943-5452.0001496)
- Cazau, P. (2004). *UNIVERSIDAD PEDAGÓGICA DE DURANGO CATEGORIZACIÓN Y OPERACIONALIZACIÓN*.
- Chang, S. E., & Falit-Baiamonte, A. (2002). Disaster vulnerability of businesses in the 2001 Nisqually earthquake. *Environmental Hazards*, 4(2), 59–71. <https://doi.org/10.3763/ehaz.2002.0406>
- Chávez López, S. (2018). El Concepto de Riesgo. In *Recursos Naturales y Sociedad* (Vol. 4, Issue 1). <https://doi.org/10.18846>
- Chow, V. Te. (1984). *Hidrología Aplicada*.
- Coronado Padilla, I. J. (2007). Escalas de medición. *Paradigmas*, Vol 2, (2). Bogotá, D. C. (julio-diciembre de 2007), pp. 104 -125
- Cui, S., Yu, T., Zhang, F., Fu, Q., Hough, R., An, L., Gao, S., Zhang, Z., Hu, P., Zhu, Q., & Pei, Z. (2020). Understanding the risks from diffuse pollution on wetland eco-systems:

- The effectiveness of water quality classification schemes. *Ecological Engineering*, 155. <https://doi.org/10.1016/j.ecoleng.2020.105929>
- Dario Cardona, O. A. (n.d.). *LA NECESIDAD DE REPENSAR DE MANERA HOLISTICA LOS CONCEPTOS DE VULNERABILIDAD Y RIESGO “Una Crítica y una Revisión Necesaria para la Gestión”*.
- De Angeli, S., Malamud, B. D., Rossi, L., Taylor, F. E., Trasforini, E., & Rudari, R. (2022). A multi-hazard framework for spatial-temporal impact analysis. *International Journal of Disaster Risk Reduction*, 102829. <https://doi.org/10.1016/j.ijdrr.2022.102829>
- Echeverri Sánchez, A., Urrutia Cobo, N., & Milena Barona Ramírez, S. (2020). *VULNERABILIDAD DE FUENTES HÍDRICAS SUPERFICIALES DE LA CUENCA DEL RÍO CERRITO A LA CONTAMINACIÓN DIFUSA AGRÍCOLA VULNERABILITY OF SURFACE WATER SOURCES OF THE CERRITO RIVER BASIN TO THE AGRICULTURAL DIFFUSE POLLUTION*.
- Fernanda, L., Escobar, C., María, A., & Gómez, M. (2021). *ESTIMACIÓN DE LA VULNERABILIDAD DE LAS FUENTES HÍDRICAS SUPERFICIALES A LA CONTAMINACIÓN DIFUSA DE ORIGEN AGRÍCOLA EN LA SUBZONA HIDROGRÁFICA GUACHAL, VALLE DEL CAUCA*.
- Fernandes, A. C. P., Terêncio, D. P. S., Pacheco, F. A. L., & Fernandes, L. F. S. (2021). A combined GIS-MCDA approach to prioritize stream water quality interventions, based on the contamination risk and intervention complexity. *Science of the Total Environment*, 798. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2021.149322>
- García, M. M., Suárez, M., & Li, M. (2013). El método Delphi para la consulta a expertos en la investigación científica Delphi method for the expert consultation in the scientific research. In *Revista Cubana de Salud Pública* (Vol. 39, Issue 2). <http://scielo.sld.cu>
- Ghiasvand, F., Babaei, A. A., Yazdani, M., & Birgani, Y. T. (2021). *Spatial modeling of environmental vulnerability in the biggest river in Iran using geographical information systems*. <https://doi.org/10.1007/s40201-021-00673-2/Published>
- Grimene, C., Mghirbi, O., Louvet, S., Bord, J.-P., & le Grusse, P. (n.d.-a). *Spatial characterization of surface water vulnerability to diffuse pollution related to pesticide contamination: case of the Gimone watershed in France*. <https://doi.org/10.1007/s11356-021-14253-2/Published>
- Hai, D. T., & Phin, T. T. (2019). Determine the vulnerability of urban surface water resources in Rach Gia city, Vietnam using geographic information system. *International Journal of GEOMATE*, 17(63), 340–346. <https://doi.org/10.21660/2019.63.77011>
- Hao, C. L., Yan, D. H., Xiao, W. H., & Yin, J. (2013). Research framework & key issues for non-point source pollution in agriculture induced by water-loss and soil-erosion. *Advanced Materials Research*, 726–731, 3855–3866. <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/AMR.726-731.3855>
- Hlalele, B. M. (2019). Iyengar-sudarshan method application to drought social vulnerability: Free State Province, South Africa. In *EM International* (Vol. 25, Issue 3).
- IEEE Computer Society., & IEEE Engineering in Medicine and Biology Society. (2009). *Proceedings, the 3rd International Conference on Bioinformatics and Biomedical Engineering : iCBBE 2009 : June 11-16, 2009 Beijing, China*. [IEEE].

- Joakim, E. P., Mortsch, L., & Oulahan, G. (2015). Using vulnerability and resilience concepts to advance climate change adaptation. *Environmental Hazards*, 14(2), 137–155. <https://doi.org/10.1080/17477891.2014.1003777>
- Kaur, L., Rishi, M. S., & Arora, N. K. (2021). Deciphering pollution vulnerability zones of River Yamuna in relation to existing land use land cover in Panipat, Haryana, India. *Environmental Monitoring and Assessment*, 193(3). <https://doi.org/10.1007/s10661-020-08832-y>
- Khan, S. (2014). Integrated Water Resources Management from Rhetoric to Practice. *New Water Policy and Practice*, 1(1). <https://doi.org/10.18278/nwpp.1.1.4>
- Lai, Y. C., Yang, C. P., Hsieh, C. Y., Wu, C. Y., & Kao, C. M. (2011). Evaluation of non-point source pollution and river water quality using a multimedia two-model system. *Journal of Hydrology*, 409(3–4), 583–595. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2011.08.040>
- Li, J., Li, H., Shen, B., & Li, Y. (2011). Effect of non-point source pollution on water quality of the Weihe River. *International Journal of Sediment Research*, 26(1), 50–61. [https://doi.org/10.1016/S1001-6279\(11\)60075-9](https://doi.org/10.1016/S1001-6279(11)60075-9)
- Maleki, P., Rahman, P., Jafariyan, H. A., Salmanmahiny, A., Ghorbani, R., Gholizadeh, M., & Harsij, M. (2020). The risk assessment of water pollution in the Gorgan Bay catchment using the WRASTIC index. *Environmental Nanotechnology, Monitoring and Management*, 14. <https://doi.org/10.1016/j.enmm.2020.100393>
- Mendoza, A., Solano¹, C., Palencia¹, D., & Garcia¹, D. (2019). Aplicación del proceso de jerarquía analítica (AHP) para la toma de decisión con juicios de expertos Application of the Analytical Hierarchy Process (AHP) for decision-making with expert judgment. *Revista Chilena de Ingeniería*, 27(3), 348–360.
- Mosquera, D. C., López, C. M., & Flores, J. C. M. (2021). Evaluation of models to estimate rainfall erosivity in Valle del Cauca, Colombia. *Acta Agronomica*, 70(2). <https://doi.org/10.15446/acag.v70n2.95115>
- Muradyan, V. S., & Asmaryan, S. G. (2015). Geocarto International Applying landscape-ecological concept and GIS modelling for assessing and mapping of ecological situation of mountainous landscapes (on the case of Syunik marz, Armenia) modelling for assessing and mapping of ecological situation of mountainous landscapes (on the case of Syunik marz Applying landscape-ecological concept and GIS modelling for assessing and mapping of ecological situation of mountainous landscapes (on the case of Syunik marz, Armenia). *Geocarto International*, 30(10), 1077–1091. <https://doi.org/10.1080/10106049.2015.1013065>
- Nantes, E. A. (2019). El Método Analytic Hierarchy Process para la Toma de Decisiones. Repaso de la Metodología y Aplicaciones. *Investigación operativa*. N° 46. pp 54-73.
- Oborenko, Z., Rivza, B., & Rivza, P. (2020). An AHP – Based assessment of scenarios for promoting employment of people with disabilities in Latvia. *Rural Sustainability Research*, 43(388), 67–74. <https://doi.org/10.2478/plua-2020-0009>
- Olaya, V. (2014). *Sistemas de Información Geográfica*.
- Ongley, E. D. (2004). Non-point source water pollution in china: Current status and future prospects. *Water International*, 29(3), 299–306. <https://doi.org/10.1080/02508060408691784>

- Ouyang, W., Cai, G., Huang, W., & Hao, F. (2016). Temporal-spatial loss of diffuse pesticide and potential risks for water quality in China. *Science of the Total Environment*, 541, 551–558. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2015.09.120>
- Ouyang, W., Hao, X., Wang, L., Xu, Y., Tysklind, M., Gao, X., & Lin, C. (2019). Watershed diffuse pollution dynamics and response to land development assessment with riverine sediments. *Science of the Total Environment*, 659, 283–292. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2018.12.367>
- Ouyang, W., Song, K., Wang, X., & Hao, F. (2014). Non-point source pollution dynamics under long-term agricultural development and relationship with landscape dynamics. *Ecological Indicators*, 45, 579–589. <https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2014.05.025>
- Reaney, S. M., Mackay, E. B., Haygarth, P. M., Fisher, M., Molineux, A., Potts, M., & Benskin, C. M. W. H. (2019). Identifying critical source areas using multiple methods for effective diffuse pollution mitigation. *Journal of Environmental Management*, 250. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2019.109366>
- Saaty, T. L. (2004). *DECISION MAKING-THE ANALYTIC HIERARCHY AND NETWORK PROCESSES (AHP/ANP)* (Vol. 13, Issue 1).
- Scholz, R. W., Blumer, Y. B., & Brand, F. S. (2012). Risk, vulnerability, robustness, and resilience from a decision-theoretic perspective. *Journal of Risk Research*, 15(3), 313–330. <https://doi.org/10.1080/13669877.2011.634522>
- Shi, W., Xia, J., Gippel, C. J., Chen, J. X., & Hong, S. (2017). Influence of disaster risk, exposure and water quality on vulnerability of surface water resources under a changing climate in the Haihe River basin. *Water International*, 42(4), 462–485. <https://doi.org/10.1080/02508060.2017.1301143>
- Stathatou, P., Kampragou, E., Grigoropoulou, H., Assimacopoulos, D., Karavitis, C., Porto, M. F. A., Gironás, J., Vanegas, M., & Reyna, S. (2016). Vulnerability of water systems: a comprehensive framework for its assessment and identification of adaptation strategies. *Desalination and Water Treatment*, 57(5), 2243–2255. <https://doi.org/10.1080/19443994.2015.1012341>
- Teoría y praxis Publicación semestral.* (n.d.).
- Torres, P., Cruz, C. H., Patiño, P., Carlos Escobar, J., & Pérez, A. (2010). *Aplicación de índices de calidad de agua-ICA orientados al uso de la fuente para consumo humano* (Vol. 30, Issue 3). En español.
- Toussaint-Jiménez (2019). *Determinación de un Índice Global de Autodepuración para ríos de montaña a partir de calidad de agua y características hidro-topográficas.* Universidad Católica de Colombia.
- Toussaint-Jimenez, N., Marimon-Bolivar, W.; Dominguez, E. (2020). Estimation of a global self-purification capacity index for Mountain Rivers from water quality data and hydrotopographic characteristics. Congreso Internacional de Innovacion y Tendencias En Ingenieria, CONIITI 2020 - Conference Proceedings. <https://doi.org/10.1109/CONIITI51147.2020.9240307>
- Universidad del Valle, C. A. R. del V. del C.-C. (2013). DEFINICIÓN DE UNA METODOLOGIA PARA LA ESTIMACIÓN DEL PARAMETRO NÚMERO DE CURVA (CN) EN CUENCAS DEL VALLE GEOGRÁFICO DEL ALTO CAUCA.

- Walker, S. M. (2005). *Secrets of a Civil War submarine : solving the mysteries of the H.L. Hunley*. Carolrhoda Books.
- Wischmeier, W.H. and Smith, D.D. (1978) Predicting Rainfall Erosion Losses: A Guide to Conservation Planning. Science, US Department of Agriculture Handbook, No. 537, Washington DC.
- Wu, C. Y., Kao, C. M., Lin, C. E., Chen, C. W., & Lai, Y. C. (2010). Using a constructed wetland for non-point source pollution control and river water quality purification: A case study in Taiwan. *Water Science and Technology*, 61(10), 2549–2555. <https://doi.org/10.2166/wst.2010.175>
- Xiang, Z., Chen, X., & Lian, Y. (2016). Quantifying the Vulnerability of Surface Water Environment in Humid Areas Base on DEA Method. *Water Resources Management*, 30(14), 5101–5112. <https://doi.org/10.1007/s11269-016-1471-y>
- Yuan, X., & Jun, Z. (2021). *Water Resource Risk Assessment Based on Non-Point Source Pollution*. <https://doi.org/10.3390/w13141907>
- Zeleňáková, M., Kubiak-Wojcicka, K., Weiss, R., Weiss, E., & Elhamid, H. F. A. (2021). Environmental risk assessment focused on water quality in the Laborec River watershed. *Ecohydrology and Hydrobiology*, 21(4), 641–654. <https://doi.org/10.1016/j.ecohyd.2021.06.002>
- grated solid waste management. *Journal of Environmental Informatics* 6, 1–15.
- Zhang, H., Huang, G.H., 2009. Building channel networks for flat regions in digital elevation models. *Hydrological Processes* 23, 2879–2887.
- Zhang, Y., Collins, A. L., Johnes, P. J., & Jones, J. I. (2017). Projected impacts of increased uptake of source control mitigation measures on agricultural diffuse pollution emissions to water and air. *Land Use Policy*, 62, 185–201. <https://doi.org/10.1016/j.landusepol.2016.12.017>
- Zhang, Y., Granger, S. G., Semenov, M. A., Upadhyay, H. R., & Collins, A. L. (2022). Diffuse water pollution during recent extreme wet-weather in the UK: Environmental damage costs and insight into the future? *Journal of Cleaner Production*, 338. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2022.130633>