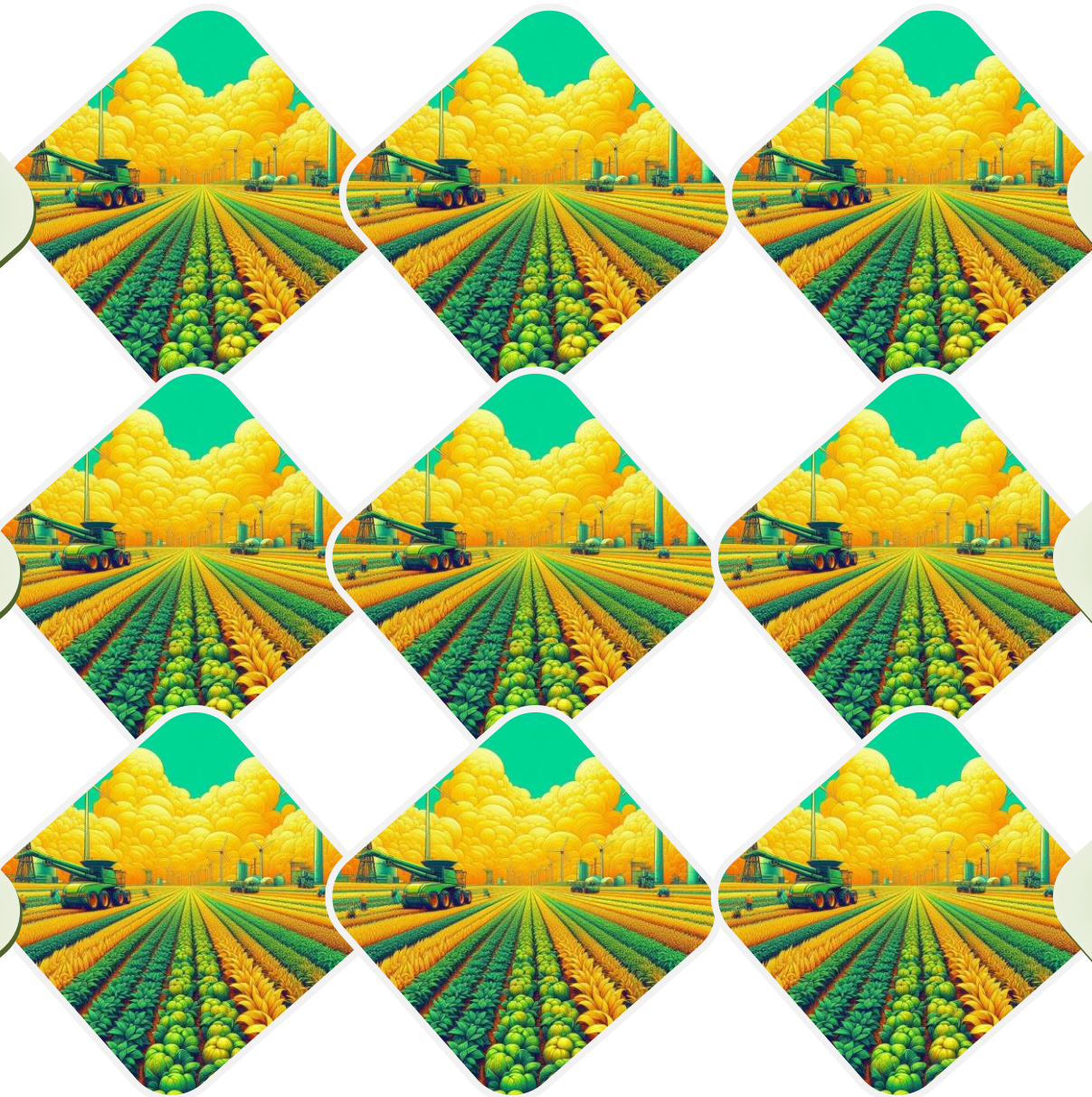




**VALORACIÓN DE LA VULNERABILIDAD A LA CONTAMINACIÓN DIFUSA DE
SUELOS POR PESTICIDAS EN EL VALLE GEOGRÁFICO DEL RÍO CAUCA**

CASO DE ESTUDIO: CUENCA DEL RÍO DESBARATADO

PRESENTADO POR:

JONATHAN STIVEN PARRA ORTIZ



**VALORACIÓN DE LA VULNERABILIDAD A LA CONTAMINACIÓN DIFUSA DE
SUELOS POR PESTICIDAS EN EL VALLE GEOGRÁFICO DEL RÍO CAUCA
CASO DE ESTUDIO: CUENCA DEL RÍO DESBARATADO**

PRESENTADO POR:

JONATHAN STIVEN PARRA ORTIZ – 1631525

Trabajo de grado presentado para optar por el título de Ingeniero Agrícola

DIRECTOR:

ANDRÉS FERNANDO ECHEVERRI SÁNCHEZ

Ingeniero Agrícola; PhD. Ingeniería Sanitaria y Ambiental

CODIRECTORA:

SANDRA MILENA BARONA RAMÍREZ

Ingeniera Agrícola; MSc Gestión Integrada del Recurso Hídrico



UNIVERSIDAD DEL VALLE

FACULTAD DE INGENIERÍA

ESCUELA DE INGENIERÍA DE RECURSOS NATURALES Y DEL AMBIENTE

ÁREA DE INGENIERÍA AGRÍCOLA Y RECURSOS HÍDRICOS

SANTIAGO DE CALI FEBRERO 2024

NOTA DE ACEPTACIÓN

Nombre Jurado

Martha Constanza Daza Torres

Nombre Jurado

Norberto Urrutia Cobo

Santiago de Cali, / /2024

AGRADECIMIENTOS

En primer lugar, expreso mi agradecimiento a los docentes Andrés Fernando Echeverri Sánchez y Sandra Milena Barona Ramirez, por su guía, conocimiento y apoyo durante todo el proceso de investigación. Su dedicación y experiencia en el campo de la ingeniería agrícola fueron fundamentales para el éxito de este trabajo.

También agradezco a la Universidad del Valle por el conocimiento impartido, las herramientas y recursos puestos a disposición, y el ambiente académico que incentivó mi crecimiento personal y profesional.

DEDICATORIA

Principalmente agradezco a Dios y la Virgen María, por permitirme culminar este importante logro en la vida académica, por darme la fortaleza y la sabiduría necesarias para superar cada desafío. A mi familia, cuya paciencia, amor y sacrificio me han inspirado y motivado a seguir adelante, demostrando que, con unidad y esfuerzo, todo es posible. A mis amistades, por su constante ánimo y compañía, por estar presentes en los momentos de duda y celebración, y por ser una fuente inagotable de alegría y apoyo.

TABLA DE CONTENIDO

1. INTRODUCCIÓN	12
JUSTIFICACIÓN	13
OBJETIVOS	15
• Objetivo General	15
• Objetivos Específicos	15
2. MARCO TEÓRICO	16
• 2.1 Conceptos fundamentales	16
■ 2.1.1 Amenaza	16
■ 2.1.2 Vulnerabilidad	16
■ 2.1.3 Riesgo	17
■ 2.1.4 Contaminación difusa	18
■ 2.1.5 Contaminación de suelos con agroquímicos	18
■ 2.1.6 Plaguicidas	19
■ 2.1.7 Fertilizantes	20
■ 2.1.8 Herbicidas	20
■ 2.1.9 Fungicidas	20
■ 2.1.10 Insecticidas	21
• 2.2 Propiedades del suelo y su relación con los agroquímicos.	21
3. ESTADO DEL ARTE	26
4. METODOLOGÍA	29
• 4.1 Descripción zona de estudio	30
• 4.2 Enfoque metodológico	31

• 4.3 Fases metodológicas	31
• 4.3.1 Etapa 1. Aplicación del Índice de Vulnerabilidad a la Contaminación de Suelos por Pesticidas (IVCPS) para estimación de los niveles de vulnerabilidad a este tipo de contaminación.	31
■ 4.3.1.1 Recolección de información	31
■ 4.3.1.2 Generación de capas ráster de cada parámetro de vulnerabilidad	31
■ 4.3.1.3 Estimación del índice	32
■ 4.3.1.4 Estimación de zonas homogéneas de vulnerabilidad	34
• 4.3.2 Etapa 2. Correlación de los niveles de vulnerabilidad de la cuenca del río Desbaratado con las coberturas del suelo con el fin de establecer, además de las interrelaciones, las interdependencias.	34
• 4.3.3 Etapa 3. Identificación de acciones para disminuir la vulnerabilidad a la contaminación difusa del suelo por el uso de pesticidas	35
5. RESULTADOS Y DISCUSIÓN	36
• 5.1 Obtención de capa ráster de pH de la cuenca del río desbaratado	36
■ 5.1.1 Reclasificación de pH de la cuenca del río Desbaratado	38
• 5.2 Obtención de capa ráster de CIC de la cuenca del río desbaratado	40
• 5.3 Obtención de los mapas de materia orgánica de la cuenca del río Desbaratado	43
• 5.4 Obtención de los mapas de textura de la cuenca del río Desbaratado	45
• 5.5 Cálculo del índice de vulnerabilidad del suelo a la contaminación por pesticidas (IVCSP) de la cuenca del río Desbaratado	48
• 5.6 Comparación entre índice de vulnerabilidad del suelo a la contaminación por pesticidas (IVCSP) y Uso del suelo de la cuenca del río Desbaratado	51

• 5.7 Identificación de acciones que reduzcan la vulnerabilidad del suelo a la contaminación difusa por pesticidas en la cuenca del río Desbaratado	54
6. Conclusiones	57
7. Recomendaciones	60
8. Bibliografía	61

LISTA DE TABLAS

Tabla 1. Categorización y normalización de los parámetros.....	33
Tabla 2. Caracterización de IVCSP.....	34
Tabla 3. Nivel de vulnerabilidad asociada al tipo de cobertura en la cuenca del río Desbaratado.	53

LISTA DE FIGURAS

Figura 1. Destino ambiental de los pesticidas, adaptado de Peña 2019 y Aparicio,2015	21
Figura 2. Esquema metodológico.....	29
Figura 3. Localización cuenca del río Desbaratado.....	30
Figura 4. Puntos con información de caracterización del pH cuenca del río Desbaratado...	37
Figura 5. Valores de pH interpolados de la cuenca del río Desbaratado.	38
Figura 6. Valores de pH rasterizados y normalizados de la cuenca del río Desbaratado	39
Figura 7. Valores de capacidad de intercambio catiónico formato poligonal de la cuenca del río Desbaratado.	41
Figura 8. Valores de capacidad de intercambio catiónico rasterizados y normalizado la cuenca del río Desbaratado.	42
Figura 9. Valores de Materia orgánica en formato poligonal de la cuenca del río Desbaratado.	43
Figura 10. Valores de materia orgánica rasterizados y normalizados de la cuenca del río Desbaratado.	44
Figura 11. Valores de textura formato poligonal de la cuenca del río Desbaratado.	46
Figura 12. Valores de textura rasterizados y normalizados de la cuenca del río Desbaratado.	47
Figura 13. Cálculo del índice de vulnerabilidad a la contaminación del suelo por pesticidas en la cuenca del río Desbaratado.	48
Figura 14. Comparación entre índice de vulnerabilidad del suelo a la contaminación por pesticidas (IVCSP) y uso del suelo de la cuenca del río Desbaratado.	52

LISTA DE ABREVIATURAS

Abreviatura	Significado	Abreviatura	Significado
AHP	Proceso Analítico Jerárquico.	IGAC	Instituto Geográfico Agustín Codazzi.
ARCGIS	Sistema de información geográfica integral.	ITPS	Panel Técnico Intergubernamental sobre Suelos.
CVC	Corporación Autónoma Regional del Valle del Cauca.	MO	Materia Orgánica.
CE	Conductividad Eléctrica.	MSPS	Ministerio de Salud y Protección Social.
CIA	Capacidad de Intercambio Aniónico.	MADS	Ministerio de Agricultura y Desarrollo Rural.
CIC	Capacidad de Intercambio Catiónico.	MVCT	Ministerio de Vivienda, Ciudad y Territorio.
CIIFEN	Centro Internacional para la Investigación del Fenómeno de El Niño.	OEA	Son las siglas de la Organización de los Estados Americanos.
CRC-OSA	Centro Regional del Clima para el Oeste de Sudamérica.	OMS	Organización Mundial de la Salud.
DANE	Departamento Administrativo Nacional de Estadística.	ONU	United Nations Human Settlements Programme.
RUT	El distrito de riego Roldanillo Unión Toro	pH	Potencial de hidrógeno
FAO	Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura.	PSI	Porcentaje de Sodio Intercambiable.
FAO-ITPS	Son las siglas de dos organizaciones relacionadas con la salud del suelo.	SIG	Sistema de Información Geográfica.
GIS	Sistema de Información Geográfica	TBI	Total, de Bases Intercambiables.
IVCSP	Índice de Vulnerabilidad de Contaminación del Suelo por Plaguicidas.	TX	Textura.
		UCS	Unidades cartográficas de suelo.

RESUMEN

Esta investigación evalúa la vulnerabilidad de los suelos agrícolas a la contaminación por plaguicidas en la cuenca del río Desbaratado, Valle del Cauca, mediante el Índice de Vulnerabilidad de Contaminación de Suelo por Plaguicidas (IVCSP) y el software ArcGIS. La metodología permitió calcular niveles de vulnerabilidad utilizando cuatro parámetros del suelo: pH, capacidad de intercambio catiónico (CIC), materia orgánica (MO) y textura, estos factores son cruciales para el cálculo de la fórmula del IVCSP. Los resultados revelan una vulnerabilidad media predominante en la cuenca, con un 73% del área en este nivel. La zona de relieve exhibe una alta vulnerabilidad, atribuida a niveles de materia orgánica por debajo del umbral promedio de 1.81, valores de pH de medianamente ácidos a muy ácidos y una CIC inferior a 15 meq/100g. Por otro lado, la zona plana presenta niveles menores de vulnerabilidad gracias a la textura del suelo. Se identificaron la CIC y la MO como factores determinantes, debido a su influencia en la cuenca al calcular el IVCSP. La investigación resalta la importancia de conservar los suelos en las zonas planas y de estudiar las áreas con alta vulnerabilidad en las zonas de relieve para prevenir contaminaciones mayores. Además, se enfatiza la necesidad de difundir información sobre la vulnerabilidad entre los agricultores e implementar medidas preventivas, como cultivos de cobertura y abonos verdes, para garantizar la sostenibilidad a largo plazo de los suelos agrícolas en la cuenca del río Desbaratado.

Palabras claves: Índice de vulnerabilidad del suelo, pesticidas, contaminación difusa, uso del suelo, cuenca río Desbaratado, parámetros del suelo.

1. INTRODUCCIÓN

La presente investigación se refiere al estudio de la vulnerabilidad a la contaminación difusa de suelos agrícolas. Para entender mejor qué es, se debe definir en primer lugar el riesgo, siendo este, el producto entre la probabilidad de que suceda un evento y las consecuencias negativas que puede ocasionar. Agregando a lo anterior, el riesgo viene ligado a dos factores, el primero es amenaza, definida por United Nations Human Settlements Programme (2002) como “un agente agresor externo potencialmente destructivo con cierta magnitud dentro de un cierto lapso de tiempo y en una cierta área”, dividiéndose en amenaza natural, socio natural o antrópica, y un segundo factor, la vulnerabilidad, definida por Neil (2006) como “el estado de susceptibilidad al daño por la exposición a tensiones asociadas con el cambio ambiental, social y por la ausencia de capacidad de adaptación”.

Para analizar la vulnerabilidad, es necesario mencionar que en Colombia la resolución No. 549 de marzo de 2017 (Ministerio de Salud y Protección Social; Ministerio de Vivienda, Ciudad y Territorio, 2017) indican que diversos procesos de contaminación de suelos están ligados a la agro-contaminación por pesticidas, debido que los componentes edáficos pueden ser variados y generar reacciones químicas que disminuyen la productividad del suelo, entre todos se destacan los pesticidas fosfatados, compuestos nitrogenados y los insecticidas organoclorados (Lugo, 2008).

En Colombia, la vulnerabilidad de suelos agrícolas es de gran interés, dado que la producción agrícola colombiana en los últimos años ha iniciado un proceso de reactivación, presentando en el segundo trimestre de 2021 un crecimiento del 3,8% (Ministerio de agricultura y Desarrollo Rural, 2021), siendo esta misma según el *DANE* (Departamento Administrativo Nacional de Estadística) una de las ramas de la economía colombiana más importantes durante la pandemia.

En el ámbito profesional como Ingeniero Agrícola, el interés en la vulnerabilidad de contaminación difusa de suelos surge como complemento para entender el riesgo al que

incurre el suelo debido a actividades agrícolas, y así poder realizar actividades de protección, o recuperación de este recurso.

Con base a lo anterior y recordando el marco propuesto en el convenio 081 de 2021 (CVC-UNIVALLE) por el grupo REGAR, se plantea realizar este trabajo de grado con el fin de aplicar una metodología que contribuya a comprender, de manera gráfica, la vulnerabilidad de la cuenca del río Desbaratado a la contaminación por plaguicidas. Por lo anterior, se utilizará información de suelo disponible en las bases de datos de la Corporación Autónoma Regional del Valle del Cauca (CVC) obtenida en estudios previos, con dicha información y disponiendo del programa ArcGIS se realizará el cálculo del índice de vulnerabilidad de contaminación de suelo por plaguicidas (IVCSP). Finalmente, se utilizará este índice para identificar los niveles de vulnerabilidad de los suelos de la cuenca del río Desbaratado a los procesos de contaminación difusa de origen agrícola como herramienta de planificación de actividades productivas y contrastar con el uso del suelo para así determinar si las actividades humanas afectan de manera negativa la vulnerabilidad de la cuenca.

JUSTIFICACIÓN

El suelo forma parte de los agroecosistemas prestando una importante función social y económica, siendo soporte y suministro de nutrientes para las plantas a fin de producir alimentos y biomasa. Esto se basa en la premisa de que en promedio una tercera parte de la superficie terrestre se dedica a la agricultura, donde la sociedad consume un 95% de alimentos ligados de formas directas o indirectas al suelo. Por lo que, si se quiere discutir de seguridad alimentaria, se debe establecer que siendo el suelo uno de los factores más importante, este mismo debe estar sano, sin limitaciones físicas, químicas o biológicas (Min Ambiente, 2016; Burbano, 2016; FAO-ITPS, 2015).

Según las Naciones Unidas, se estima que para el año 2050 la población mundial aumente a 9000 millones de personas, ejerciendo así una gran carga para los suelos, ya que estos deberán producir alimentos suficientes para suplir sus necesidades, entonces, si actualmente muchos países debido a una producción intensiva han empobrecido sus suelos, la seguridad

alimentaria de hoy día y futura se verá comprometida si no se comienza a implantar normativas desde los países que busquen identificar, valorar y clasificar la vulnerabilidad de los mismos para así frenar su contaminación y degradación (Burbano, 2016; FAO-ITPS, 2015).

En Colombia se ha buscado la implementación de una política de gestión sostenible del suelo que propone desde el 2016 un plan de acción para los siguientes 20 años, buscando educar al pequeño y gran productor por medio de capacitación y sensibilización para dar a conocer técnicas de producción más amigables. De igual manera, se busca fortalecer entidades públicas y privadas, contar con un monitoreo constante del estado de los suelos, además, incentivar la investigación y transferencia de conocimiento entre los diferentes entes involucrados. Por último, lograr una estabilidad productiva tal que se pueda hablar de una producción que logra preservar el suelo (Min. Ambiente, 2016).

El riesgo a contaminación de suelos por uso de agroquímicos se puede tomar desde dos factores, el primero, la amenaza que representan de por sí la aplicación de los agroquímicos al suelo, sea por acumulación de iones que reaccionan y acidifican, hasta una contaminación difusa a fuentes hídricas. Y un segundo factor que es la vulnerabilidad natural de los suelos gracias a sus características, en otras palabras, la presencia de una textura que facilita la bioacumulación de los excedentes de fertilizantes, la falta de materia orgánica que funcione como disposición para los agroquímicos, o el valor de pH que propicie o no el lavado de bases intercambiables por alta presencia de hidrogenión resultante de uso de fertilizantes nitrogenados (Sadeghian, 2003; Gómez 2001).

Naturalmente, cuando se piensa en riesgo se acostumbra estudiar la amenaza que genera este y se suele olvidar que bajo ciertas condiciones aunque exista la amenaza, si el ente amenazado no es vulnerable no se podría hablar de un riesgo, en el caso del suelo esto toma gran importancia, ya que por medio de diversas investigaciones como la de Postma (1994), se han identificado que características tales como CIC, pH, %MO, textura, etc., influyen en gran medida en la contaminación o no de un suelo.

De la premisa anterior, aparece la idea de estudiar por separado la vulnerabilidad de una cuenca a la contaminación difusa, y con esta información poder tomar decisiones acerca de cuales zonas de la propia son más vulnerables a sufrir procesos de degradación o pérdida de suelo, por el simple hecho de poseer factores propios que le impidan resistir el aporte excesivo de fertilizantes y pesticidas.

OBJETIVOS

- **Objetivo General**

Valorar la vulnerabilidad a la contaminación difusa de suelos por pesticidas en el Valle Geográfico del río Cauca tomando como caso de estudio la cuenca del río Desbaratado.

- **Objetivos Específicos**

- OE1: Aplicar el Índice de Vulnerabilidad a la Contaminación de Suelos por Pesticidas (IVCPS) para la estimación de los niveles de vulnerabilidad a este tipo de contaminación.
- OE2: Correlacionar los niveles de vulnerabilidad de la cuenca del río Desbaratado con las coberturas del suelo para el análisis de las interrelaciones y las interdependencias.
- OE3: Identificar acciones para la reducción de la vulnerabilidad a la contaminación difusa del suelo por el uso de pesticidas para la zona de estudio.

2. MARCO TEÓRICO

- **2.1 Conceptos fundamentales**

- **2.1.1 Amenaza**

La amenaza es descrita desde la ley 1523 del 2012 cuyo epígrafe es “La gestión del riesgo de desastres”, como un peligro presente de que un evento de tipo físico puede ser de origen natural o por acción humana, se presente, ocasionando daños. El caso del suelo y para el objetivo de este estudio se identificó amenaza como el ingreso de un ente externo en este caso los pesticidas sin control que puede causar degradación (Congreso de la República de Colombia, 2012).

De igual manera, para Guevara (2023) la amenaza se representa como un potencial de ocurrencia de un suceso que puede causar una consecuencia indeseable, sea de origen natural o por intervención del hombre, que se puede presentar en una ubicación con una intensidad y dirección determinada, en caso de la zonificación, diversas entidades buscan incluir por ejemplo volúmenes o áreas de deslizamiento y la probabilidad de ocurrencia de los mismos para así hacer recomendaciones para construcciones o cultivos.

Cuando se habla de amenazas naturales, se debe especificar la importancia de fenómenos atmosféricos, hidrológicos, geológicos e incendios que, por su ubicación, severidad o frecuencia, tienden a afectar a los seres vivos, su estructura o actividad (Comisión Interamericana de Derechos Humanos., 2009).

- **2.1.2 Vulnerabilidad**

La palabra vulnerabilidad es un vocablo compuesto proveniente del latín que significa “probabilidad de ser herido”, esto ayuda a entender como la vulnerabilidad es una fragilidad sea física, económica, social, ambiental o institucional que existe por parte de un ser vivo u objeto de ser afectado por un evento adverso peligroso que se presente (Congreso de la República de Colombia, 2012).

La vulnerabilidad se conforma de tres dimensiones, una dimensión de exposición la cual es el grado bajo el cual una sociedad o un ecosistema entra en contacto con un riesgo; la segunda se conoce como sensibilidad y representa como estos seres vivos se ven afectados por la exposición. Por último, la resiliencia definida como la capacidad que tiene los afectados de soportar o recuperarse ante un ataque (Gómez, 2001).

Para Gómez (2001) la vulnerabilidad la identifican como una incapacidad que tiene un ser u objeto de autoajustes a efectos causados por un cambio en su medio, siendo inflexible e incapaz de adaptarse a este cambio, en el caso del suelo, la vulnerabilidad está relacionada directamente con los parámetros que le conforman, tales como capacidad de intercambio catiónico, pH, textura y porcentaje de materia orgánica (Gómez, 2001).

■ 2.1.3 Riesgo

El término riesgo se interpreta como la unión de probabilidades de ocurrencia entre un evento y sus consecuencias negativas. El riesgo se divide en dos factores, inicialmente, se tiene la amenaza que representa el objeto, ser vivo o sistema que puede afectar de manera perjudicial, por otro lado, la vulnerabilidad que se tiene a dicha amenaza (CIIFEN & CRC OSA, 2022).

El riesgo se puede abarcar desde diversos ámbitos, en términos cuantitativos se han conceptualizado entre diversos expertos describir el riesgo como una función de tres factores, probabilidad de que suceda un evento potencialmente dañino, la vulnerabilidad que se tiene al evento, y su importancia sea económica, ambiental o cultural. Por otro lado, en términos cualitativos, se define el riesgo como una probabilidad de suceder daños o pérdidas en comunidades o sus bienes, entendiendo la probabilidad de que sucedan estos eventos como una amenaza (Guevara, 2023).

En síntesis, el riesgo se define como un producto entre la probabilidad de ocurrencia de un evento y las consecuencias que se derivan del mismo.

■ 2.1.4 Contaminación difusa

La contaminación ambiental se entiende como el ingreso de sustancias nocivas a un medio ambiente que produce inseguridad en el mismo. Un ser vivo, medio físico o ecosistema es considerado medio ambiente, y la sustancia contaminante es variable sea química o energética. Entendiendo entonces la contaminación ambiental como un proceso cíclico que involucra aire, agua y suelo, siendo resultado de los hábitos de vida y consumo (Domínguez, 2015).

Dentro de la contaminación ambiental se encuentra una categoría denominada contaminación difusa definiéndose así debido a que no proviene de fuentes puntuales. En el caso de los suelos si esta contaminación es de origen agrícola o a causa de actividades de este se llama contaminación difusa por agroquímicos. Las actividades agrícolas causan un aporte de sustancias como nitratos, fosfatos, sales de potasio y plaguicidas, que alteran las características del suelo (Ministerio de Salud y Protección Social, 2017).

■ 2.1.5 Contaminación de suelos con agroquímicos

La OMS (Organización Mundial de la Salud) define los agroquímicos como sustancias o combinación de sustancias que buscan la prevención o destrucción de ácaros, roedores, insectos, moluscos, hongos, bacterias, malas hierbas y otros animales o vegetales que pueden afectar de manera negativa los cultivos, o la salud de las personas (Vivas, 2020).

La contaminación de suelos por agroquímicos no es algo que se produce con inmediatez, ya que este tipo de contaminación en muchos casos se realiza en función del tiempo, debido a que son transformados y degradados durante su paso por el geociclo, significando esto que aunque tardía, los contaminantes pueden afectar diferentes elementos debido a su volatilidad o capacidad de movimiento, entre los elementos afectados encontramos el agua (subterránea o superficial), el suelo, la atmósfera y en diversos casos pueden afectar a seres vivos o directamente al ser humano (Espinosa y Barba, 2014).

Dos de las clasificaciones de fertilizantes más utilizados y por ende los que más debe ponerse en análisis son los nitrogenados y fosfatados, siendo estos muy importantes desde un punto

de vista ecológico influyendo en diversos procesos de la planta. En los últimos años se ha dispuesto especial cuidado a los nitratos debido a su facilidad para ser convertidos por microorganismos en compuestos nítricos, los cuales cuentan con la propiedad de reaccionar a proteínas y formar toxinas conocidas por influir en la aparición de células cancerígenas (Espinosa y Barba, 2014).

■ 2.1.6 Plaguicidas

Actualmente la organización de las Naciones Unidas para la agricultura y la alimentación determina como plaguicida, cualquier sustancia o mezcla utilizadas para repeler, prevenir, destruir o realizar control de plagas que sean capaces de producir daños en plantas o animales. Como ha sido planteado por las autoras Fernández y Viciano (2003), los plaguicidas de manera general son utilizados para disminuir y/o impedir pérdidas en la producción de alimentos, contribuyendo de igual manera al control de vectores de diversas enfermedades. A partir de lo mencionado anteriormente, utilizaré la clasificación de los plaguicidas según las autoras Fernández, N. y V. Viciano, junto con A. Drovandi (2003), quienes los agrupan con base en diversos criterios, tales como:

- Concentración (Ingrediente activo, plaguicida técnico, plaguicida formulado)
- Organismos que controlan (Insecticidas, Acaricidas, Bactericidas, Rodenticidas, Avicidas, etc.)
- Modos de acción (De Contacto, Repelentes, De Ingestión, Defoliantes, Fumigantes)
- Composición química (Organoclorados, Triazinas, Organofosforados, Compuestos de cobre, Piretroides, Organoazufrados, etc.)
- Presentación de formulaciones (Sólidos, Líquidos, Gaseosos)
- Uso al que se destinan (Agrícola, Urbano, Pecuario, Industrial, Forestal, Doméstico).

En la agricultura destacan tres grupos de plaguicidas debido a su extenso uso, composición y muchas veces siendo fuentes de contaminación de suelos, uno de ellos son los organoclorados que pueden ser agentes contaminantes debido a que suelen persistir en el medio ambiente actuando de manera venenosa al contacto. Por otra parte, los plaguicidas

organofosforados que tal como su nombre lo dice son compuestos creados a base del ácido fosfórico, son de alto cuidado debido a su toxicidad para aves, mamíferos y algunos peces. Por último, los plaguicidas carbamatos, los cuales de manera similar a los organofosforados tienen funciones inhibitoras de enzimas, pero se diferencia debido a su derivación del ácido carbámico, aunque su persistencia en el ambiente es menor debido a su composición, en los últimos años estos han tomado relevancia por su efecto neurotóxico en el hombre (Aguilera, 2017).

■ 2.1.7 Fertilizantes

Los fertilizantes o abonos son productos que, de manera aprovechable, cuentan con uno o diversos elementos nutritivos que intervienen positivamente en la fertilidad o crecimiento de las plantas. Estos se pueden presentar en dos tipos: mineral y orgánico. Los fertilizantes minerales son comúnmente producidos por el hombre a través de la industria química o mediante la exploración y explotación de yacimientos. Por otro lado, los fertilizantes orgánicos, tal como su nombre lo indica, tienen un origen animal o vegetal (Fernández, 2003).

■ 2.1.8 Herbicidas

Son sustancias químicas que buscan eliminar, suprimir o interrumpir el desarrollo de plantas no deseadas en la producción de un cultivo. Debido a su accionar, los herbicidas normalmente cuentan con recomendaciones muy específicas de uso que busca ser aplicados en cultivos que toleren el accionar de ellos, y solo afecte a especies no deseadas pero susceptibles al herbicida (Macias & Salvatierra, 2019).

■ 2.1.9 Fungicidas

Culturalmente se considera al fungicida como un producto que busca eliminar los hongos, pero, el término se extiende aún más, debido a que involucran también los compuestos que buscan otorgar resistencia al cultivo o que transforman el medio ambiente en un lugar que

limita o impide el desarrollo y crecimiento adecuado de un organismo del reino fungi (Malgarejo, 2011).

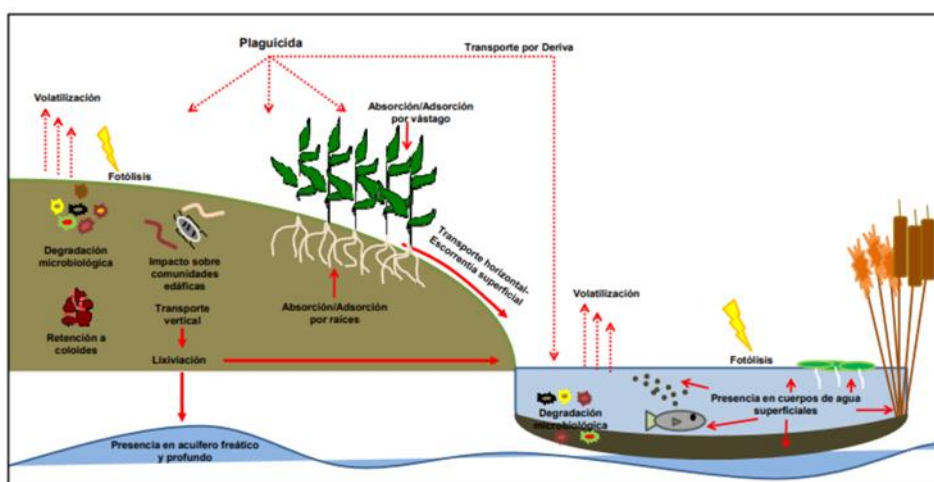
■ 2.1.10 Insecticidas

Son compuestos químicos que buscan eliminar organismos que se consideran perjudiciales para los cultivos, buscando la inhibición de enzimas vitales de plagas de insectos que lleguen a disminuir el rendimiento del cultivo (Silva et al, 2002). En cuestión de contaminación tal como menciona Echeverri, et al., (2020), los insecticidas tienen un mayor índice de movilidad de partículas, lo cual de manera directa aumenta la probabilidad de expandirse a otros medios diferentes al suelo.

- **2.2 Propiedades del suelo y su relación con los agroquímicos.**

Los agroquímicos tienen diferentes interacciones dependiendo el medio en el que se encuentren, en el caso de los suelos, siendo compuestos químicos que generan un riesgo debido a que interactúan con componentes bióticos y abióticos del mismo, por lo cual, afectan procesos metabólicos y bioquímicos. Es importante resaltar que esto varía de acuerdo con la vida media o facilidad de metabolizarse que tenga el agroquímico, ya sea por hidrólisis y fotólisis puede ser degradado o por lo contrario entre más tiempo permanezcan en el suelo aumenta su posibilidad de bioacumularse en los coloides y materia orgánica (Aguilera, 2017). Los procesos de retención (sorción y adsorción), transporte (lixiviación) y degradación son los que determinan el destino final de un plaguicida (Ou et al., 2020). Una vez que se introduce en el suelo, el plaguicida se distribuye en las fases sólida, líquida y gaseosa (Figura 1). En la fase líquida, el plaguicida puede ser transformado o degradado química, física o microbiológicamente en otros compuestos. En la fase sólida, el plaguicida queda retenido con diferentes grados de fuerza en enlaces por los coloides orgánicos (materia orgánica) e inorgánicos (minerales de arcillas) del suelo. En la fase gaseosa, el plaguicida se incorpora a la atmósfera cuando se volatiliza desde el suelo o desde el agua (Aparicio, 2015).

Figura 1. Destino ambiental de los pesticidas, adaptado de Peña 2019 y Aparicio, 2015



El tiempo de permanencia de los pesticidas en el suelo está determinado por la fuerza con la que se adhieren a sus componentes y por la rapidez con que se descomponen. Estos procesos son parte de una variedad de procesos físicos, químicos y biológicos complejos y dinámicos (Arias-Estévez et al., 2008). Están relacionados con las características intrínsecas de la molécula, como su carácter ácido o básico, solubilidad en agua y presión de vapor, así como con las particularidades del suelo, como su textura, pH, capacidad de intercambio catiónico y contenido de materia orgánica. Además, factores ambientales como la temperatura y la humedad también influyen en estos procesos (Peña, 2019).

Diversos estudios como el realizado por Postma,(1994) o el de Orsag (2003) citado por Tangara (2010) , establece que los parámetros con mayor peso al hablar de contaminación de suelos, se encuentra influenciado por diversas propiedades, físicas, químicas y biológicas que caracterizan este recurso, siendo las más relevantes: Textura; Estructura; Profundidad efectiva del suelo; Reacción del suelo (pH); Capacidad de Intercambio Catiónico (CIC) y Aniónico (CIA); Total de Bases Intercambiables (TBI); Conductividad Eléctrica (CE); Porcentaje de Sodio Intercambiable (PSI); Contenido de materia orgánica y Humus. La importancia de estos parámetros recae en valores específicos donde la vulnerabilidad del medio aumenta o disminuye dependiendo de estos.

El efecto de los pesticidas en el pH del suelo puede variar dependiendo del tipo de pesticida y de las características del suelo en el que se aplica. Algunos pesticidas, como los herbicidas que contienen ácido acético, pueden disminuir el pH del suelo y hacerlo más ácido. Otros

pesticidas, como los insecticidas que contienen carbonato de calcio, pueden aumentar el pH del suelo y hacerlo más básico (Orozco et al, 2016).

En general, los pesticidas pueden afectar el pH del suelo al alterar la actividad microbiana y la descomposición de la materia orgánica, lo que puede influir en la capacidad del suelo para amortiguar los cambios en el pH. Además, algunos pesticidas pueden incidir en la disponibilidad de nutrientes esenciales para las plantas al afectar el pH del suelo. Debido a esto es importante considerar, que un incremento en el pH del suelo puede aumentar la disponibilidad de algunos nutrientes como el calcio y el magnesio, mientras que una disminución del pH puede aumentar la disponibilidad de nutrientes como el hierro y el manganeso. Por lo tanto, es importante considerar los efectos potenciales de los pesticidas en el pH del suelo al seleccionar y aplicar pesticidas. Otro ejemplo es con la aplicación excesiva de plaguicidas organofosforados que puede causar un exceso de fósforo en el suelo que interfiere con procesos de absorción de micronutrientes tales como zinc y hierro. Por otra parte, fertilizantes fabricados a base de sulfato de potasio en forma de potasa con mal manejo agrícola, puede aumentar el pH del suelo lo que contribuye a disminuir la absorción de nutrientes (Orozco et al, 2016).

Los pesticidas pueden afectar la capacidad de intercambio catiónico (CIC) del suelo, que es una medida de la capacidad del suelo para retener y liberar iones positivos, como el calcio, el magnesio, el potasio y el sodio. La CIC del suelo está influenciada por la presencia de partículas cargadas negativamente en el suelo, como los minerales de arcilla y la materia orgánica. Los pesticidas pueden interactuar con estas partículas cargadas negativamente y reducir la CIC del suelo. Esto se debe a que algunos pesticidas pueden competir con los iones positivos por los sitios de adsorción en la superficie de las partículas del suelo, lo que resulta en una disminución de la CIC (Sadeghian, 2003).

Además, algunos pesticidas pueden aumentar la CIC del suelo. Por ejemplo, los pesticidas que contienen calcio pueden aumentar la CIC al reemplazar los iones de hidrógeno y aluminio en la superficie de las partículas del suelo. Sin embargo, este efecto es generalmente temporal y la CIC del suelo volverá a su valor original una vez que el pesticida se degrade o

se lixivie del suelo. En general, la alteración de la CIC del suelo por los pesticidas puede afectar la disponibilidad de nutrientes esenciales para las plantas y la calidad del suelo en general. Por lo tanto, es importante considerar los efectos potenciales de los pesticidas en la CIC del suelo al seleccionar y aplicar pesticidas. Un ejemplo a destacar es el caso de los fertilizantes nitrogenados donde su aplicación genera excedentes de hidrogenión, los cuales, de manera paulatina, reemplaza las bases presentes en los suelos, siendo estas lavadas y transportadas a los horizontes subyacentes, acompañadas de aniones en las aguas de percolación. Se debe resaltar que este efecto depende de la fuente empleada debido a que la acidez que provoca el sulfato de amonio es superior a la que proviene del nitrato de amonio o urea (Sadeghian, 2003).

Otros efectos de los pesticidas es la afectación a la materia orgánica del suelo de varias maneras. La materia orgánica del suelo está compuesta principalmente de residuos de plantas y animales que se descomponen en el suelo, y es fundamental para su fertilidad y su salud. Algunos pesticidas pueden afectar la descomposición de la materia orgánica al inhibir la actividad microbiana del suelo. Los microbios del suelo son responsables de descomponer la materia orgánica en el suelo y convertirla en nutrientes que las plantas pueden usar. Si los pesticidas matan o inhiben la actividad de los microbios del suelo, la descomposición de la materia orgánica se ralentizará, lo que puede reducir la disponibilidad de nutrientes para las plantas. Además, algunos pesticidas pueden reducir la cantidad de materia orgánica en el suelo al matar organismos presentes en el, como lombrices y otros invertebrados que ayudan a descomponer la materia orgánica. Esto puede tener un efecto negativo en la estructura y la calidad del suelo, y puede hacer que sea más propenso a la erosión y la compactación (Aguilera, 2017).

En resumen, los pesticidas pueden afectar la materia orgánica del suelo al inhibir la actividad microbiana, matar organismos del suelo y afectar la capacidad de las plantas para producir materia orgánica. Por lo tanto, es importante considerar los efectos potenciales de los pesticidas en la materia orgánica del suelo al seleccionar y aplicar pesticidas. Algunas propiedades físicas del suelo, como la textura, se le atribuye la facilidad de adsorción de

compuestos pertenecientes a los fertilizantes, debido a que esto ocurre mayormente en texturas arcillosas. Por otra parte, mantener valores óptimos de porcentaje de materia orgánica en el suelo es esencial para prevenir la bioacumulación de sustancias químicas en los coloides. Un adecuado nivel de materia orgánica mejora la capacidad del suelo para retener y liberar nutrientes de manera equilibrada, lo que contribuye a una mayor estabilidad de los compuestos químicos y reduce el riesgo de acumulación excesiva de plaguicidas o metales pesados. (Aguilera, 2017).

Diversos pesticidas pueden afectar la textura del suelo al interactuar con sus componentes. Por ejemplo, los pesticidas que se unen fuertemente a las partículas de arcilla pueden reducir la capacidad de retención de agua y nutrientes. También pueden formarse complejos entre los pesticidas y los cationes del suelo (como calcio, magnesio y potasio), lo que puede reducir la disponibilidad de estos nutrientes para las plantas. En general, los efectos de los pesticidas en el suelo dependen de la composición química del pesticida, la textura, composición del suelo y las prácticas agrícolas (Hermosín 1978).

3. ESTADO DEL ARTE

Valencia & Rodríguez (2015) realizaron la valoración de la vulnerabilidad a la salinización de los suelos del distrito de riego y drenaje RUT por las prácticas de fertilización, donde se detectaron diversas amenazas, tales como la irrigación de cultivos con agua de baja calidad, la variación de niveles freáticos que ascienden hasta casi la superficie del terreno, y prácticas culturales inadecuadas en diferentes cultivos. Estas amenazas pueden llevar a los suelos a un riesgo por salinización, por lo que es pertinente realizar la evaluación de vulnerabilidad de estos. Para obtener esta información, se realizó un muestreo aleatorio en 96 predios, obteniendo mediante entrevistas la información de prácticas culturales. Con dicha información, se creó un mapa en el programa ArcGIS 10.3.1 representativo de las prácticas agrícolas según el cultivo. Con esta información, se calculó el Índice de Vulnerabilidad de Salinización por Fertilizantes (IVSF), generando un mapa utilizando el método de análisis multicriterio y asignando pesos a los factores más importantes. Como resultado, se encontró que el 89% del área del distrito cuenta con una probabilidad media o alta de sufrir salinización por fertilizantes.

(Ramón et al. (2015), con el objetivo de identificar el nivel de vulnerabilidad a la salinización asociado al factor climático, realizó un estudio en el que se obtuvieron datos de estaciones meteorológicas. Con esta información se calcularon la evaporación y precipitación de la zona de estudio, y se generó un mapa en ArcGIS 10.3, zonificando la probabilidad de precipitación y los valores de evapotranspiración tanto anual como mensual. Con la zonificación de las dos variables, se calculó un índice de aridez mediante álgebra de mapas, permitiendo así el cálculo de la vulnerabilidad basada en parámetros agroclimáticos. Los resultados mostraron una baja vulnerabilidad al factor climático en escenarios de precipitación promedio, y una vulnerabilidad media en escenarios de precipitación crítica. En cuanto a la evapotranspiración, se detectó poca variabilidad, y el índice de aridez tampoco mostró gran importancia en la vulnerabilidad a la salinización.

Morales (2018), en su investigación sobre la metodología de análisis del riesgo por contaminación de agroquímicos en la provincia de Guanacaste, tuvo como objetivo hallar parámetros hidrogeológicos y edafológicos de la cuenca que pudieran ser utilizados para el análisis de filtración de fertilizantes y plaguicidas. Obtuvo como resultado que los parámetros químicos del suelo con mayor correlación con la contaminación de nitratos en aguas subterráneas (entre un 32% y 68%) fueron: la capacidad de intercambio catiónico, la relación entre aluminio y sílice, el porcentaje de retención de nitratos, el pH del suelo, y el porcentaje de arcillas y limos en los suelos.

Echeverri et al. (2020) determinaron el Índice de Vulnerabilidad de las Fuentes Hídricas Superficiales a la Contaminación Difusa de origen agrícola en la cuenca del río Cerrito, Valle del Cauca. El objetivo fue generar un instrumento de apoyo a la planificación de acciones de prevención, mitigación y recuperación de suelos. A partir del estudio, se detectó que la mayor parte de la cuenca presentaba una vulnerabilidad media, principalmente en cultivos de caña de azúcar en la zona plana de la cuenca y pasturas de ladera. De igual manera, se detectaron focos de alta vulnerabilidad asociados a cultivos de hortalizas, cítricos y vid. Es posible concluir que en la zona plana se presentan vulnerabilidades por malas prácticas agrícolas, mientras que la zona de ladera se ve afectada por características del terreno, como la pendiente y la erosión.

La investigación realizada por la Corporación Autónoma Regional del Valle del Cauca y la Universidad del Valle (2021), titulada "Convenio interadministrativo 081 de 2021 actividad 1: evaluación de la contaminación difusa en el suelo por agroquímicos, fertilizantes orgánicos y de síntesis química", se centra en mapear la vulnerabilidad de los suelos a la contaminación difusa en las cuencas La Vieja, RUT, Morales y Sonso, en el Valle del Cauca, Colombia. La metodología incluye la conceptualización del fenómeno, un análisis bibliométrico de la contaminación de suelos por plaguicidas y el cálculo del Índice de Vulnerabilidad de Contaminación de Suelo por Plaguicidas (IVCSP), que clasifica la vulnerabilidad en niveles de muy baja a muy alta. Los resultados indican que, en la cuenca La Vieja, por porcentaje de área, la vulnerabilidad es dominante en Alta (36.66 %), Media (33.58 %) y Muy Alta (27.66

%), mientras que las categorías Baja y Muy Baja suman solo el 1.39 % y 0.72 %, respectivamente. En la cuenca Morales, las áreas con mayor vulnerabilidad son Media (55.34 %), Alta (21.33 %) y Muy Alta (12.47 %); en la cuenca Sonso, Media (63.35 %), Alta (19.54 %) y Baja (14.24 %); y en la cuenca RUT, Media (61.52 %) y Alta (33.82 %).

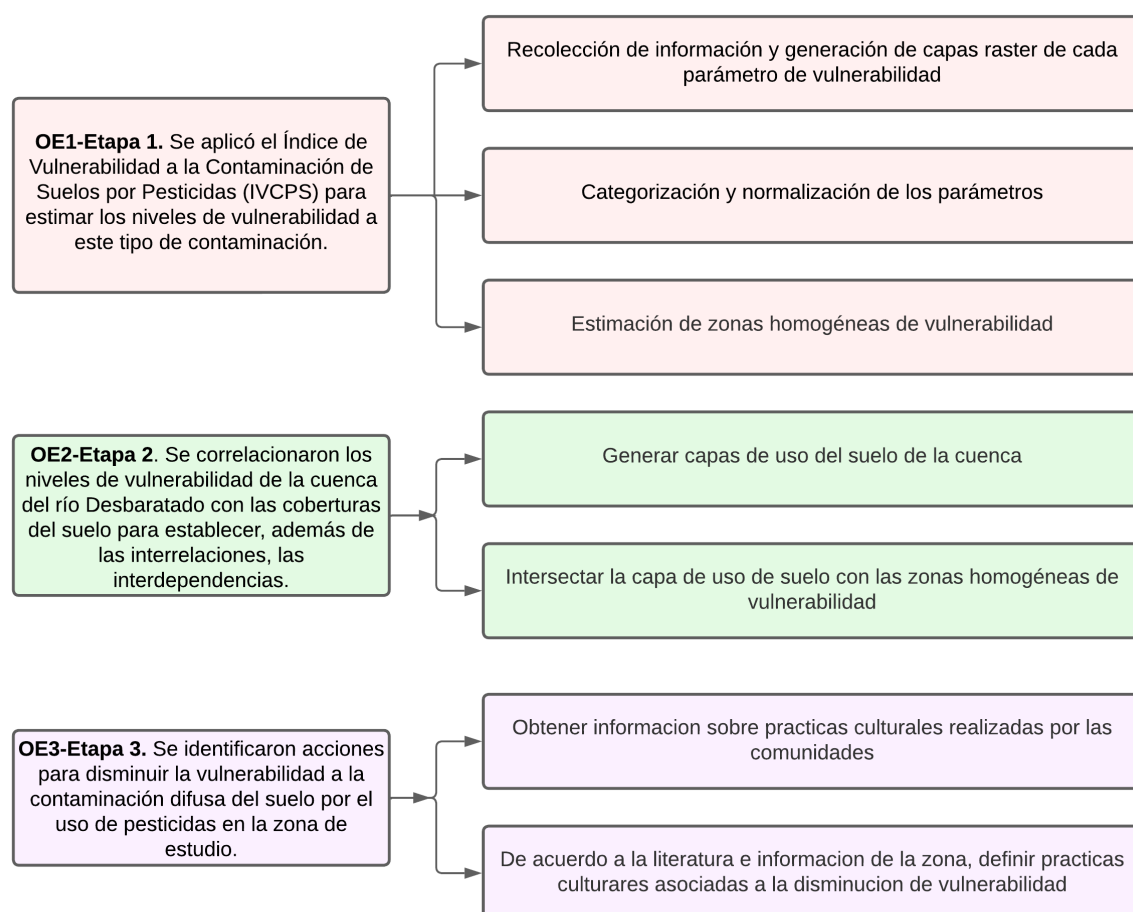
Finalmente, la investigación de Lince Sadeghian & Díaz (2021) evaluó el índice de vulnerabilidad del suelo afectado por el cambio climático en los municipios de Balboa y Santuario (Risaralda) y Salamina (Caldas). El cambio climático ha producido variaciones en la precipitación, afectando la fertilidad del suelo, disminuyendo la disponibilidad de nutrientes y contribuyendo a la erosión. Para el estudio, se seleccionaron aleatoriamente 432 predios cafeteros, y se construyeron tres índices de sensibilidad mediante una estructura de agregación aritmética ponderada, con valores de peso definidos a partir del conocimiento de expertos. Los resultados subrayaron la necesidad de realizar intervenciones para aumentar la resiliencia del suelo frente a cambios en la precipitación, recomendándose un manejo adecuado de fertilizantes, enmiendas y abono orgánico, así como la implementación de prácticas de manejo integrado de arvenses y coberturas muertas.

Por último, Echeverri (2022) desarrolló un modelo para identificar los niveles de vulnerabilidad a la salinización presentes en los distritos de irrigación de áreas planas. Este estudio también tuvo como objetivo proporcionar una herramienta para prevenir el riesgo de salinización de los suelos. Se diseñaron dos herramientas: la primera aplicó el análisis multicriterio llamado Proceso Analítico Jerárquico (AHP) para identificar los pesos y asignar un valor normalizado a los parámetros de análisis. Además, se utilizaron sistemas de información geográfica para detectar zonas donde la vulnerabilidad del suelo se comporta de manera homogénea. Los parámetros que influyen en la vulnerabilidad, como el índice de aridez, la textura del suelo y las prácticas de fertilización, fueron identificados. Se encontró que el 71.8% del territorio presenta una vulnerabilidad media y un 27.9% alta a la salinización.

4. METODOLOGÍA

La metodología fue de tipo descriptiva y permitió cumplir con los objetivos propuestos. Estuvo compuesta por tres etapas que se desarrollaron de manera secuencial. La primera etapa buscó cumplir el primer objetivo específico, (aplicar el Índice de Vulnerabilidad a la Contaminación de Suelos por Pesticidas (IVCPS) para estimar los niveles de vulnerabilidad a este tipo de contaminación). La segunda etapa cumplió con el segundo objetivo específico, (correlacionar los niveles de vulnerabilidad de la cuenca del río Desbaratado con las coberturas del suelo, con el fin de establecer, además de las interrelaciones, las interdependencias). La tercera etapa abordó el último objetivo específico, (identificar acciones para disminuir la vulnerabilidad a la contaminación difusa del suelo por el uso de pesticidas), como se presenta en la Figura 2.

Figura 2. Esquema metodológico

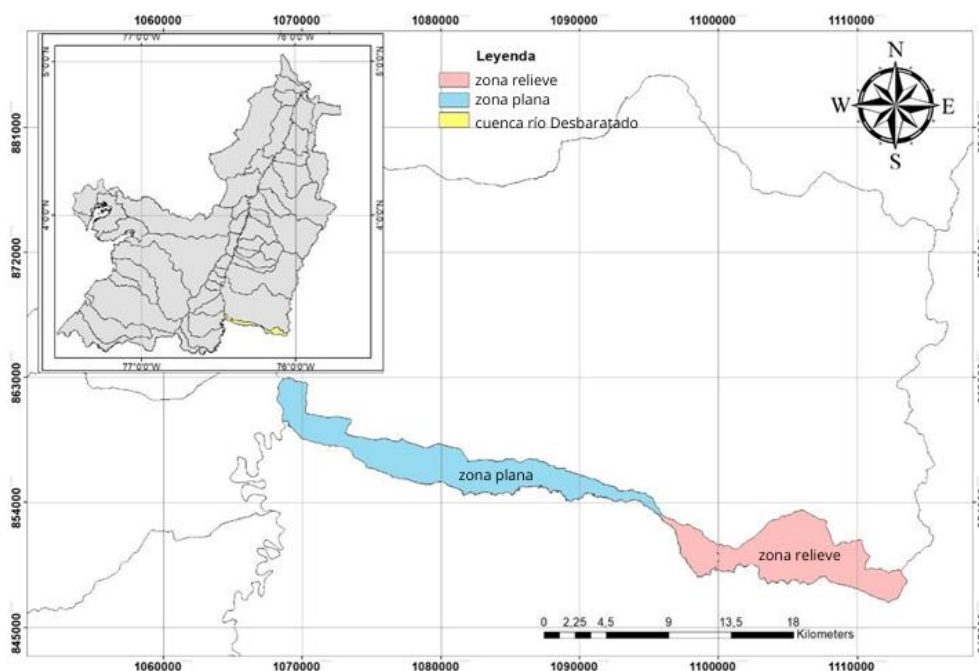


Fuente: Elaboración propia.

• 4.1 Descripción zona de estudio

La cuenca del río Desbaratado se localiza entre el departamento del Valle del Cauca y el departamento del Cauca, su cauce principal recorre una extensión de 64 km, limita al norte con la cuenca del río Guachal, al sur con el departamento del Cauca, al oriente con el departamento del Tolima y al occidente con el río Cauca; nace en el páramo de Las Hermosas a una altura de 3600 m.s.n.m., el cual limita los departamentos de Valle del Cauca y Cauca. Tal como se puede observar en la Figura 3, la cobertura en la cuenca del río Desbaratado se puede dividir en dos zonas, plana y de relieve. En el caso de la zona plana se encuentra en gran medida vegetación boscosa y de protección natural (85% del área total), seguido por pastos para ganadería con 13% y en menor medida cultivos permanentes y cuerpos de agua ambos con un 1%. En contraparte, la zona de relieve cuenta con cultivos permanentes que abarcan un 93% del área total, acompañado de un 2% en pasto para ganadería, al igual que los cultivos semipermanentes y por último un 1% la vegetación de protección forestal, cuerpos de agua y cultivos transitorios (CVC, 2017).

Figura 3. Localización cuenca del río Desbaratado.



Fuente: Adaptado de Balance oferta – demanda de agua cuenca del río Desbaratado CVC 2017.

- **4.2 Enfoque metodológico**

Es importante destacar que este trabajo buscó identificar, analizar y responder a factores de riesgo presentes en el suelo asociados con la vulnerabilidad. Se usaron como apoyo herramientas de SIG con el objetivo de diseñar una estrategia que permitiera a las autoridades gubernamentales tomar decisiones sobre una cuenca. Para cumplir con este objetivo se utilizó el Índice de Vulnerabilidad de Contaminación de Suelo por Plaguicidas (IVCSP), el cual fue descrito en el convenio interadministrativo 081 2021 (CVC & UNIVALLE, 2021).

- **4.3 Fases metodológicas**

A continuación, se detallan cada uno de los pasos que lo componían.

- **4.3.1 Etapa 1. Aplicación del Índice de Vulnerabilidad a la Contaminación de Suelos por Pesticidas (IVCPS) para estimación de los niveles de vulnerabilidad a este tipo de contaminación.**

- **4.3.1.1 Recolección de información**

Con el objetivo de llevar a cabo el proyecto sobre vulnerabilidad de contaminación difusa de suelos agrícolas, se requirió obtener información cartográfica básica y temática de la cuenca del río Desbaratado. Para ello, se recurrió a la base de datos GeoCVC, que permitió acceder a información detallada acerca de la red hídrica, los centros poblados, la cobertura y uso del suelo, así como datos de suelo y elevación. Es importante destacar que la información de la cuenca se encuentra dividida en zona plana y zona de ladera, lo que representó un aspecto clave a considerar en la planificación del proyecto.

- **4.3.1.2 Generación de capas ráster de cada parámetro de vulnerabilidad**

El Shapefile utilizado fue suministrado por la base de datos del Instituto Geográfico Agustín Codazzi (IGAC) y contiene unidades cartográficas de suelo (UCS), de las cuales se extrajo información adquirida en estudios anteriores para obtener capas ráster de los cuatro

parámetros involucrados en la vulnerabilidad del suelo: pH, capacidad de intercambio catiónico (CIC), textura y materia orgánica (MO). De estos cuatro parámetros, el pH estaba en formato de puntos, mientras que los demás se encontraban en formato vectorial. Se agregaron columnas con los valores correspondientes utilizando la herramienta de edición. Para visualizar polígonos de manera independiente, se utilizó la herramienta "Multipart to Singlepart", disponible en la sección de "Features", dividiendo la información para su análisis y estudio posterior.

En este caso la información del pH se encontró en formato de puntos, y se realizó la interpolación de datos, utilizando el límite de la cuenca del río Desbaratado y la herramienta "Interpolación" disponible en la caja de herramientas "Spatial Analyst Tools". Como resultado, se obtuvo una predicción de valores para las celdas de un ráster a partir de una cantidad limitada de puntos de datos de muestra. Para realizar la interpolación, se seleccionó el método de interpolación Kriging o IDW, dependiendo si para calcular la regresión estadística del parámetro se hacía basada en un punto o como un promedio entre estos. Al momento de interpolar, fue importante seleccionar el archivo de ingreso y el nombre de salida; de igual manera, se estableció la extensión de la interpolación y la máscara. Con el fin de mejorar la visualización de los datos, fue pertinente entrar en el apartado de "Propiedades" y en la casilla denominada "Symbology" para establecer una división de colores acorde

■ 4.3.1.3 Estimación del índice

Previo al cálculo del IVCSP, se realizó la normalización de cada parámetro según la información entregada por cada índice de calidad del suelo, en el cual se categorizaron la Materia Orgánica (MO), la capacidad de intercambio catiónico (CIC) y el pH según rangos umbrales esperados. Para categorizar el parámetro de textura, se utilizó como guía un índice de vulnerabilidad de fuentes hídricas a la contaminación difusa de plaguicidas. En La tabla 1 se observó la categorización y normalización de los parámetros involucrados en el índice de vulnerabilidad a la contaminación difusa de suelos agrícolas (CVC & UNIVALLE, 2021).

Tabla 1. Categorización y normalización de los parámetros

PARÁMETRO	UMBRAL	NIVEL DE VULNERABILIDAD	CATEGORÍAS DEL MAPA DE SUELOS	VALOR NORMALIZADO
pH	< 4.60	Muy alta	Extremadamente ácido	1
	4.6 a 5.4	Alta	Muy fuertemente ácido - fuertemente ácido	0,857
	5.41 a 6.4	Moderadamente alta	Medianamente ácido - ligeramente ácido	0,714
	6.41 a 7.30	Media	Neutro	0,571
	7.40 a 8.10	Moderadamente baja	Ligeramente alcalino	0,429
	8.20 a 8.8	Baja	Medianamente alcalino	0,286
	>8.90	Muy baja	Fuertemente alcalino - extremadamente	0,143
CIC	<5	Muy alta	Muy baja fertilidad	1
	5 a 10	Alta	Baja fertilidad	0,857
	10 a 15	Moderadamente alta	Moderada a baja fertilidad	0,714
	15 a 20	Media	Moderada fertilidad	0,571
	20 a 25	Moderadamente baja	Moderada a alta fertilidad	0,429
	25 a 40	Baja	Alta fertilidad	0,286
	mayor a 40	Muy baja	Muy alta fertilidad	0,143
MO	<0.8	Muy alta	Muy baja fertilidad	1
	0.81 a 1.20	Alta	Baja fertilidad	0,857
	1.21 a 1.80	Moderadamente alta	Moderada a baja fertilidad	0,714
	1.81 a 2.30	Media	Moderada fertilidad	0,571
	2.31 a 3	Moderadamente baja	Moderada a alta fertilidad	0,429
	3.01 a 4	Baja	Alta fertilidad	0,286
	Mayor a 4.01	Muy baja	Muy alta fertilidad	0,143
Textura	Texturas pesadas: arcillas	Alta	Muy finas y finas	1
	Texturas medias, arcillo- limosa, arcillo arenosa, franca, franco- arcillosa, franco- arcillo-arenosa, franco-arcillo- limosa, franco	Moderada	Moderadamente finas a moderadamente gruesas y medias	0,667
	Texturas livianas, franco- arenosa, arenosa, limosa, franco- limosa	Baja	Gruesa a fina, gruesa a moderadamente gruesa y gruesa a moderadamente fina	0,333

Fuente: Convenio interadministrativo 081 2021, (CVC, 2021)

Posterior a la normalización de los parámetros para realizar la estimación del índice de vulnerabilidad de contaminación difusa de suelos, se utilizó la herramienta “Ráster

Calculator”, disponible en la pestaña de álgebra de mapas, en la caja de herramientas “Spatial Analyst Tools”. En esta calculadora de ráster se ingresó la siguiente expresión:

$$IVCSP = [(0.301 \times CIC) + (0.298 \times MO) + (0.250 \times TX) + (0.151 \times pH)]$$

Donde:

CIC: Capacidad de Intercambio Catiónico

MO: Materia Orgánica

TX: Textura

pH: Potencial de Hidrogeniones

Que consistía en una suma de los cuatro parámetros multiplicados cada uno por su valor de normalización, obteniendo así una nueva capa que representaba el IVCSP.

■ 4.3.1.4 Estimación de zonas homogéneas de vulnerabilidad

La estimación de zonas homogéneas de vulnerabilidad se realizó utilizando la herramienta "Reclassify", la cual generó un mapa basado en los valores normalizados de la tabla 2.

Tabla 2. Caracterización de IVCSP

NIVEL DE VULNERABILIDAD	UMBRAL	COLOR
Muy baja	0,00-0,20	
Baja	<0,20-0,40	
Media	<0,40-0,60	
Alta	<0,60-0,80	
Muy alta	<0,80-1,00	

Fuente: convenio interadministrativo 081 2021, (CVC, 2021)

- **4.3.2 Etapa 2. Correlación de los niveles de vulnerabilidad de la cuenca del río Desbaratado con las coberturas del suelo con el fin de establecer, además de las interrelaciones, las interdependencias.**

Para la correlación entre la cobertura de suelo y las zonas homogéneas de vulnerabilidad calculada, se empleó la herramienta "Intersect". Esto permitió analizar la cobertura dominante

en áreas donde los valores de vulnerabilidad eran altos o bajos, así como los tipos de coberturas presentes, facilitando la identificación, análisis y recomendación del riesgo de contaminación en la cuenca del río Desbaratado.

- **4.3.3 Etapa 3. Identificación de acciones para disminuir la vulnerabilidad a la contaminación difusa del suelo por el uso de pesticidas**

En el proceso de identificación de las acciones necesarias en la cuenca del río Desbaratado para disminuir la vulnerabilidad de los suelos, se priorizó la recopilación de información sobre las actividades realizadas en la zona con este propósito, utilizando datos de entidades públicas y privadas. Este enfoque permitió identificar las labores más viables para aplicar o continuar ejecutando. Posteriormente, basándose en el conocimiento obtenido de la literatura, se definieron prácticas asociadas a la reducción de la vulnerabilidad. Entre estas prácticas, según los resultados obtenidos, se promovieron técnicas de gestión del suelo sostenibles, se controló la cantidad y calidad de los residuos, se incentivó la adopción de tecnologías limpias y se fortaleció la educación y concienciación ambiental.

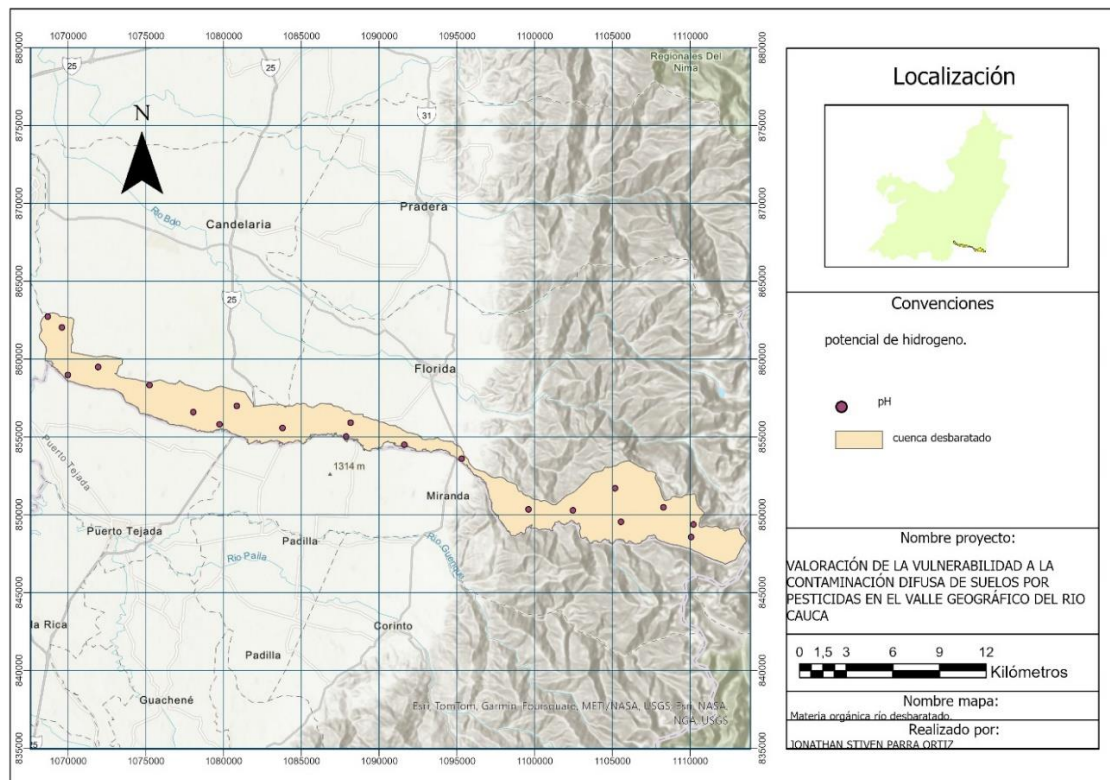
5. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

En el contexto del estudio de la vulnerabilidad del suelo, se considera su variabilidad inherente, la cual está asociada a parámetros edáficos como la textura, el pH, la capacidad de intercambio catiónico (CIC) y el contenido de materia orgánica (MO). Comprender la vulnerabilidad del suelo es crucial debido a su influencia en posibles efectos de degradación, la pérdida de su capacidad productiva, o su capacidad para cumplir funciones ambientales. Esto se debe a que una afectación en la microbiota del suelo puede alterar los procesos biológicos fundamentales (Vivas, 2020).

- **5.1 Obtención de capa ráster de pH de la cuenca del río desbaratado**

Para la presente investigación, se han empleado datos de pH obtenidos a partir de la información disponible en la página web GeoCVC, perteneciente a la Corporación Autónoma Regional del Valle del Cauca (CVC). Estos datos se contrastaron con los proporcionados en el estudio de suelo regional “Levantamiento de suelos y zonificación de tierras del departamento de Valle del Cauca”, escrito por el IGAC-CVC 2006. La combinación de estas fuentes permitió obtener valores de pH en diversos puntos a lo largo de la cuenca del río Desbaratado. Herramientas de análisis espaciales fueron utilizadas para filtrar únicamente los puntos de datos que se encuentran dentro de la cuenca del río Desbaratado, resultando en un total de 20 puntos con información de caracterización del pH. Estos datos se pueden visualizar en la Figura 4, la cual ilustra la distribución espacial de los puntos de pH dentro de la cuenca del río Desbaratado.

Figura 4. Puntos con información de caracterización del pH cuenca del río Desbaratado.

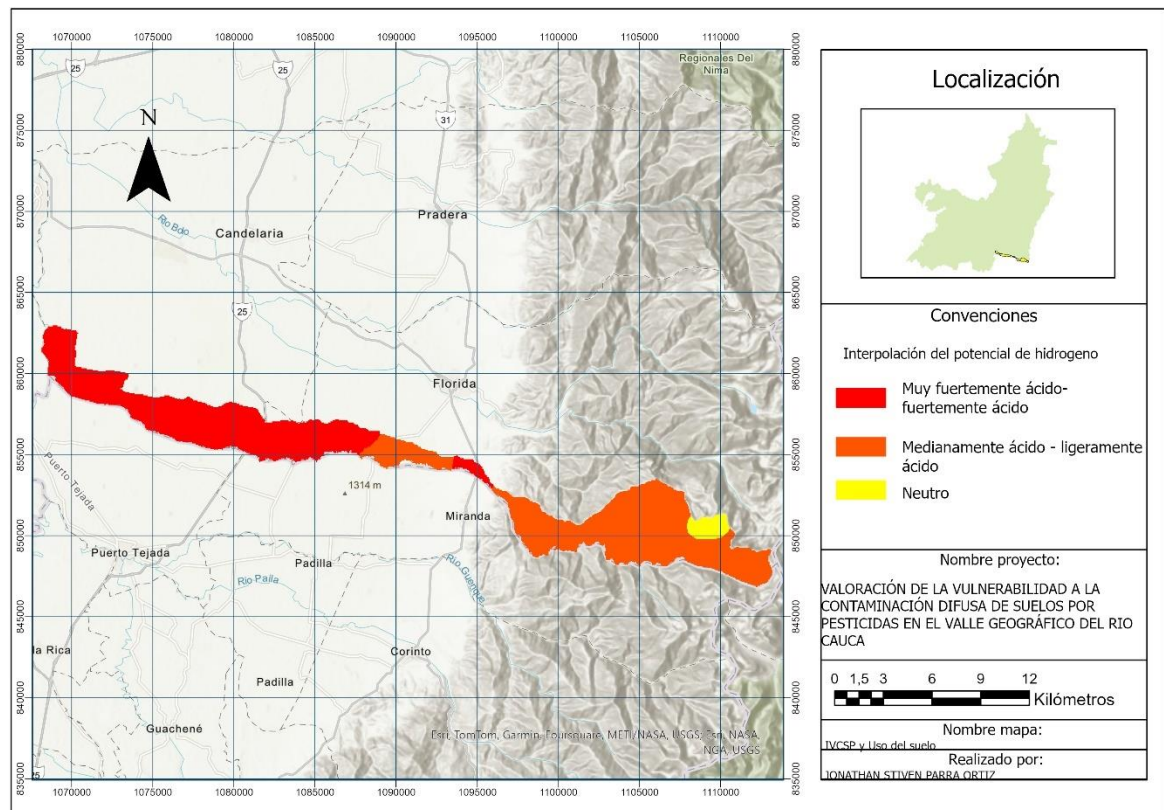


Dado que la información puntual dificulta el cálculo de valores de pH para un área extensa como la cuenca del río Desbaratado, es imperativo emplear técnicas de interpolación para espacializar los datos de pH. En este contexto, se ha utilizado la herramienta de ArcGIS denominada Kriging. Antes de aplicar esta técnica, se revisó la normalidad de los datos con el apoyo de ArcGIS, ya que el método de Kriging se basa en la suposición de que los datos siguen una distribución normal. Esta técnica permite estimar valores desconocidos en ubicaciones no muestreadas a partir de los datos disponibles en puntos específicos, por lo que es crucial verificar la calidad y precisión de los datos.

La aplicación del método de interpolación Kriging ha proporcionado resultados significativos en la estimación del pH a lo largo de toda la cuenca de estudio. Esto ha permitido generar una especialización de la variable pH en comparación con la información original basada en puntos de muestreo individuales. La Figura 5 presenta una distribución espacial detallada del pH, evidenciando una mejora visualización de la información respecto a los datos puntuales

iniciales. Esta metodología facilita una mejor comprensión de la distribución del pH en la cuenca del río Desbaratado.

Figura 5. Valores de pH interpolados de la cuenca del río Desbaratado.

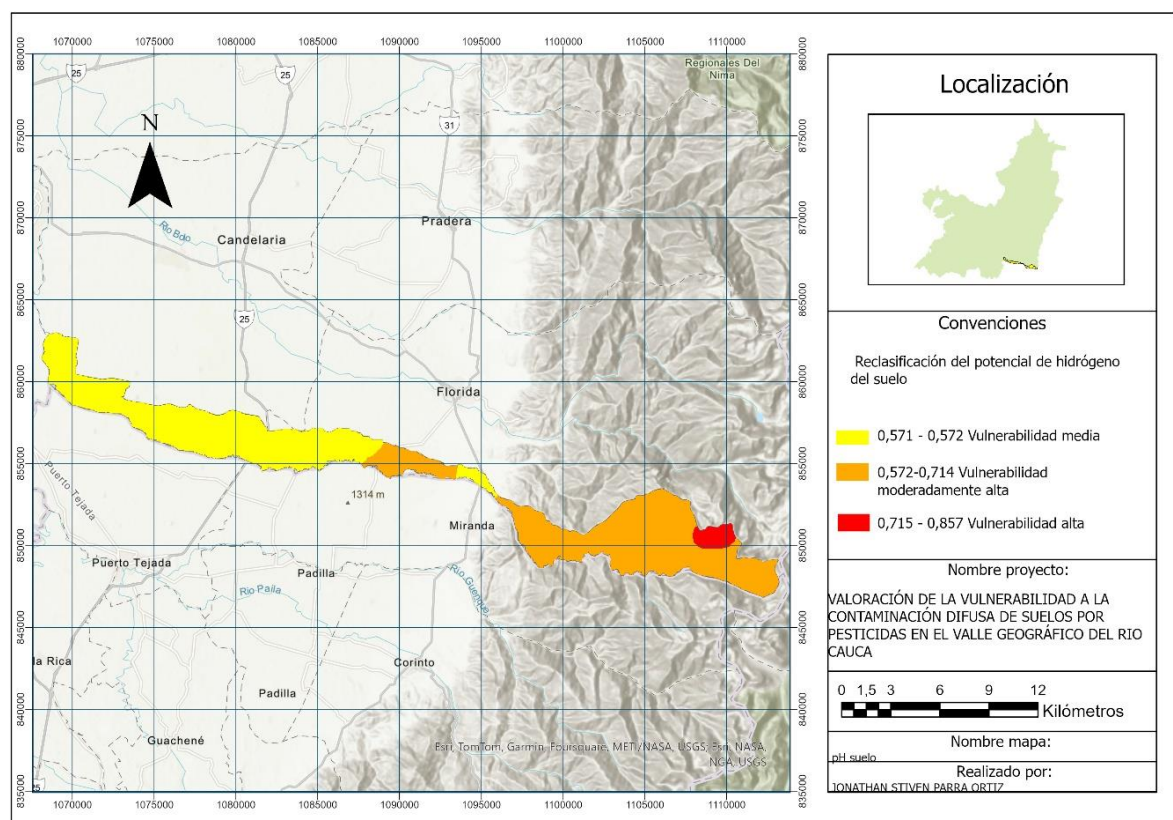


■ 5.1.1 Reclasificación de pH de la cuenca del río Desbaratado

Con el objetivo de obtener los valores de pH en rangos homogéneos conforme a los observados en la Tabla 1 sobre la categorización y normalización de los parámetros, se llevó a cabo una reclasificación del ráster correspondiente al pH utilizando la herramienta "Reclassify". Este procedimiento ajustó los datos de pH a una escala uniforme de nivel de vulnerabilidad muy baja a muy alta, resultando en una capa ráster que cumple con los criterios necesarios para aplicar la fórmula del índice de vulnerabilidad del suelo a la contaminación por pesticidas (IVCSP), representada en la figura 6. Este paso es crucial para asegurar que todos los parámetros se encuentren en un formato compatible y estandarizado, facilitando así una integración precisa y efectiva en el análisis espacial requerido para evaluar la susceptibilidad del suelo a la contaminación por pesticidas.

Los resultados obtenidos a partir del mapa de pH, en el cual los valores han sido normalizados, muestran vulnerabilidades medias, moderadamente altas y altas. La zona de relieve ubicada al este de la cuenca del río Desbaratado presenta la mayor vulnerabilidad, con zonas puntuales de vulnerabilidad alta, mientras que la zona plana ubicada al oeste de la cuenca exhibe vulnerabilidades intermedias. El factor pH podría tener un impacto significativo en los resultados finales al calcular la vulnerabilidad de la cuenca mediante el IV CSP. Estos niveles de vulnerabilidad altos, en el mapa de pH están asociados a diversos factores, como la calidad del agua, en particular el uso de riego con agua altamente alcalina, la aplicación de enmiendas orgánicas o minerales, y el uso excesivo de fertilizantes con reacciones ácidas o alcalinas. Estos elementos combinados influyen en la propensión del suelo a la contaminación por pesticidas.

Figura 6. Valores de pH rasterizados y normalizados de la cuenca del río Desbaratado

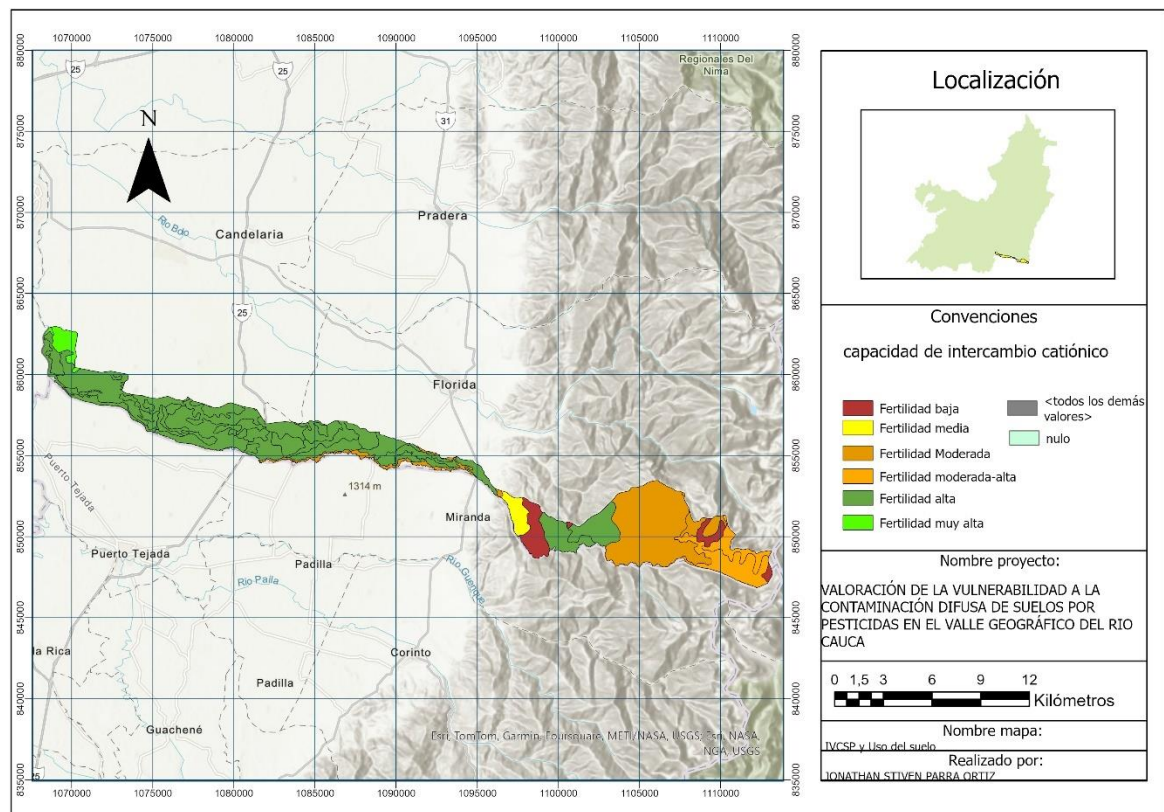


- **5.2 Obtención de capa ráster de CIC de la cuenca del río desbaratado**

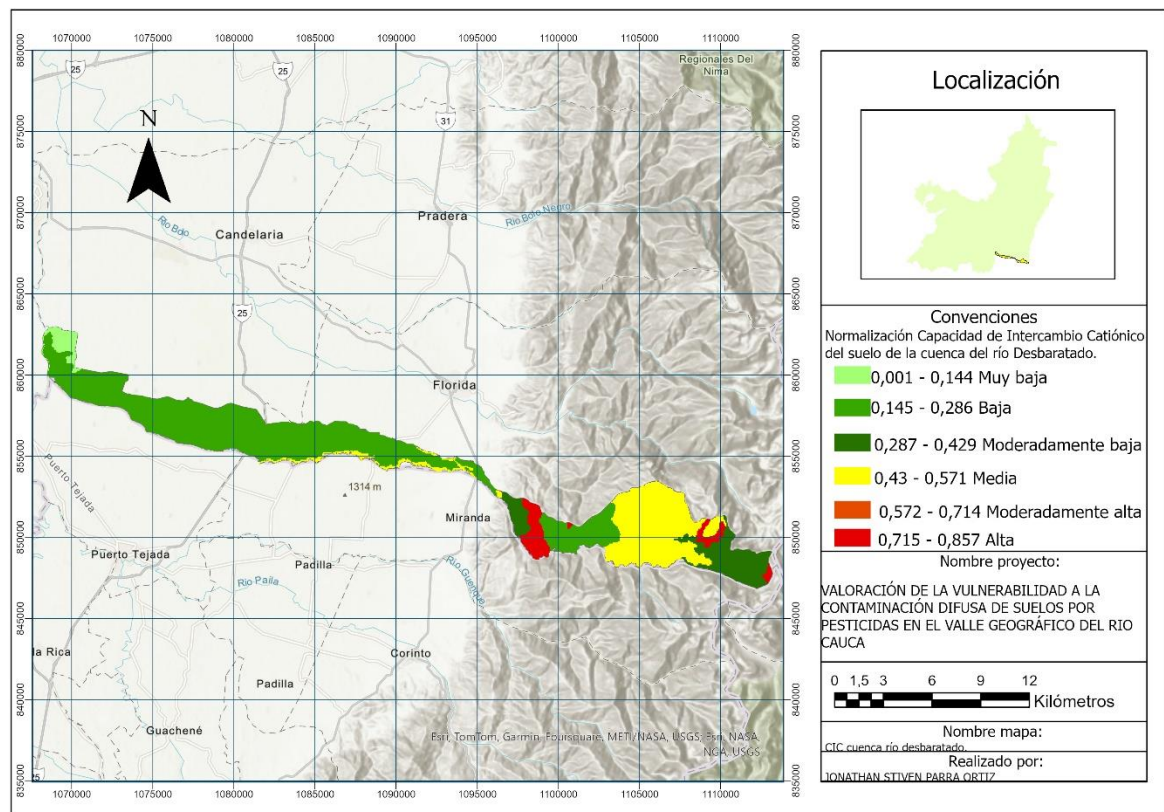
Para la generación de una capa ráster de la Capacidad de Intercambio Catiónico (CIC), se parte de un mapa poligonal derivado de la información disponible en la página web GeoCVC, perteneciente a la Corporación Autónoma Regional del Valle del Cauca (CVC). Este mapa contiene códigos de clasificación de suelo que indican niveles de fertilidad, abarcando desde muy baja hasta muy alta. Para descifrar estos códigos de suelo, es crucial consultar el estudio regional de suelos "Levantamiento de suelos y zonificación de tierras del departamento de Valle del Cauca" del IGAC-CVC (2004), el cual ofrece una caracterización detallada del suelo. La información sobre la Capacidad de Intercambio Catiónico (CIC) se integra como un nuevo campo de valores normalizados dentro del shapefile de polígonos. Para ello, se emplea la herramienta de edición disponible en ArcGIS. La creación de esta tabla se optimiza gracias a la calculadora de campos, la cual facilita la transformación de categorías cualitativas, como los niveles de fertilidad, en valores numéricos compatibles con las herramientas de SIG y, en el futuro, con la fórmula del IVCSP. La Figura 7 presenta la información obtenida tras la normalización de los valores de CIC.

Este proceso de normalización y transformación de los datos es esencial para asegurar que todos los parámetros se encuentren en un formato estandarizado y compatible con la fórmula de IVCSP, permitiendo una integración precisa y efectiva en el análisis espacial requerido para evaluar la vulnerabilidad del suelo a la contaminación por pesticidas.

Figura 7. Valores de capacidad de intercambio catiónico formato poligonal de la cuenca del río Desbaratado.



La generación de un ráster de la capacidad de intercambio catiónico se realizó utilizando la herramienta "feature to raster". Esta herramienta permite convertir datos vectoriales como polígonos a una capa ráster. Esta herramienta, facilita la representación de datos en forma de píxeles que cubren un área continua, donde cada píxel tiene un valor asociado. El ráster resultante es esencial para el cálculo de vulnerabilidad mediante la fórmula IVCSP. Estos datos se presentan en la figura 8.



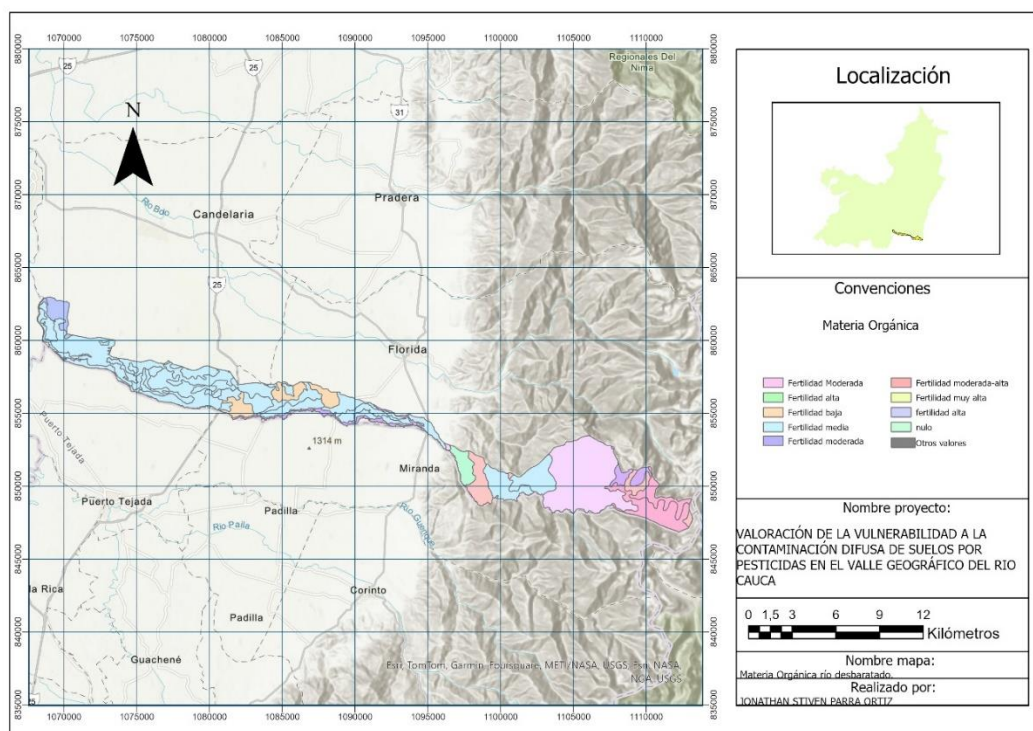
El análisis del mapa de capacidad de intercambio catiónico (CIC) revela una notable heterogeneidad, en las características del suelo, donde el CIC ejerce una influencia significativa en la posible vulnerabilidad de la cuenca del río Desbaratado, que varía desde niveles muy bajos hasta altos. Se destaca particularmente la zona plana ubicada al oeste de la cuenca, donde los niveles de vulnerabilidad asociados al CIC no superan la media, siendo predominantemente bajos y muy bajos. Por otro lado, en la zona de relieve ubicada al este de la cuenca, se identifican extensiones de suelo donde el CIC podría contribuir a valores de IV CSP altos, produciendo vulnerabilidades elevadas o moderadamente altas frente a la exposición a pesticidas. Estos hallazgos sugieren que los valores de CIC en la zona de relieve podrían indicar la presencia de suelos con contenido orgánico reducido o con limitada capacidad de retención de nutrientes. Este entendimiento es esencial para el cálculo del índice, y así poder realizar una gestión efectiva de la cuenca del río Desbaratado.

- **5.3 Obtención de los mapas de materia orgánica de la cuenca del río Desbaratado**

Con la intención de adquirir una capa ráster de materia orgánica (MO), se inicia con un mapa de información poligonal obtenido de la página web GeoCVC, perteneciente a la Corporación Autónoma Regional del Valle del Cauca (CVC). Este mapa contiene códigos de clasificación del suelo que indican niveles de fertilidad, abarcando desde muy baja hasta muy alta fertilidad. Para convertir estos códigos en información cuantitativa, se valida y complementa con la información proporcionada en el estudio “Levantamiento de suelos y zonificación de tierras del departamento de Valle del Cauca,” elaborado por el IGAC-.CVC en 2004.

Posteriormente, con el apoyo de la herramienta de edición disponible en ArcGIS y la calculadora de campos, se crea un nuevo campo en la tabla de atributos con valores de MO. Este proceso de normalización permite cuantificar de manera uniforme los niveles de vulnerabilidad por porcentaje de materia orgánica del suelo. La información resultante se presenta en la Figura 9.

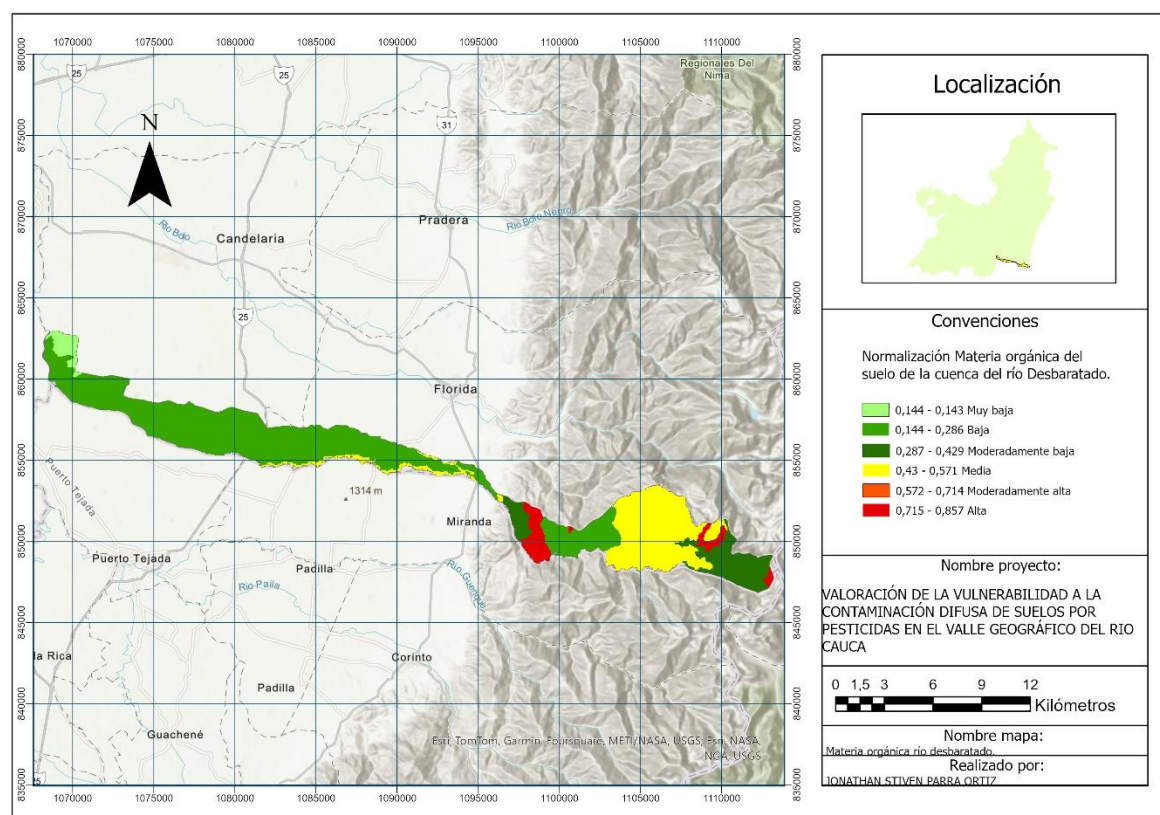
Figura 9. Valores de Materia orgánica en formato poligonal de la cuenca del río Desbaratado.



La creación de una capa ráster de materia orgánica (MO) que permita el cálculo del Índice de Vulnerabilidad del Suelo a la Contaminación por Pesticidas (IVCSP) se realizó mediante la herramienta “Feature to Raster” de ArcGIS. Esta herramienta es fundamental para transformar datos vectoriales de materia orgánica en una capa ráster, facilitando la conversión de entidades poligonales a un formato ráster.

La herramienta “Feature to Raster” permite representar la información en forma de píxeles, donde cada píxel del ráster resultante posee un valor asociado que refleja la cantidad de materia orgánica presente en esa ubicación específica. La generación de la capa ráster de materia orgánica es un paso esencial para el cálculo de la vulnerabilidad del suelo a la contaminación por pesticidas. El resultado de este proceso se muestra en la Figura 10.

Figura 10. Valores de materia orgánica rasterizados y normalizados de la cuenca del río Desbaratado.



La disponibilidad limitada de información que se puede obtener de los mapas y la interrelación existente entre la materia orgánica, la capacidad de intercambio catiónico y los niveles de fertilidad del suelo han repercutido en la generación de un mapa que guarda similitud con el

presentado anteriormente en relación con la capacidad de intercambio catiónico. Sin embargo, esto no significa que sea poco representativo de la cuenca del río Desbaratado.

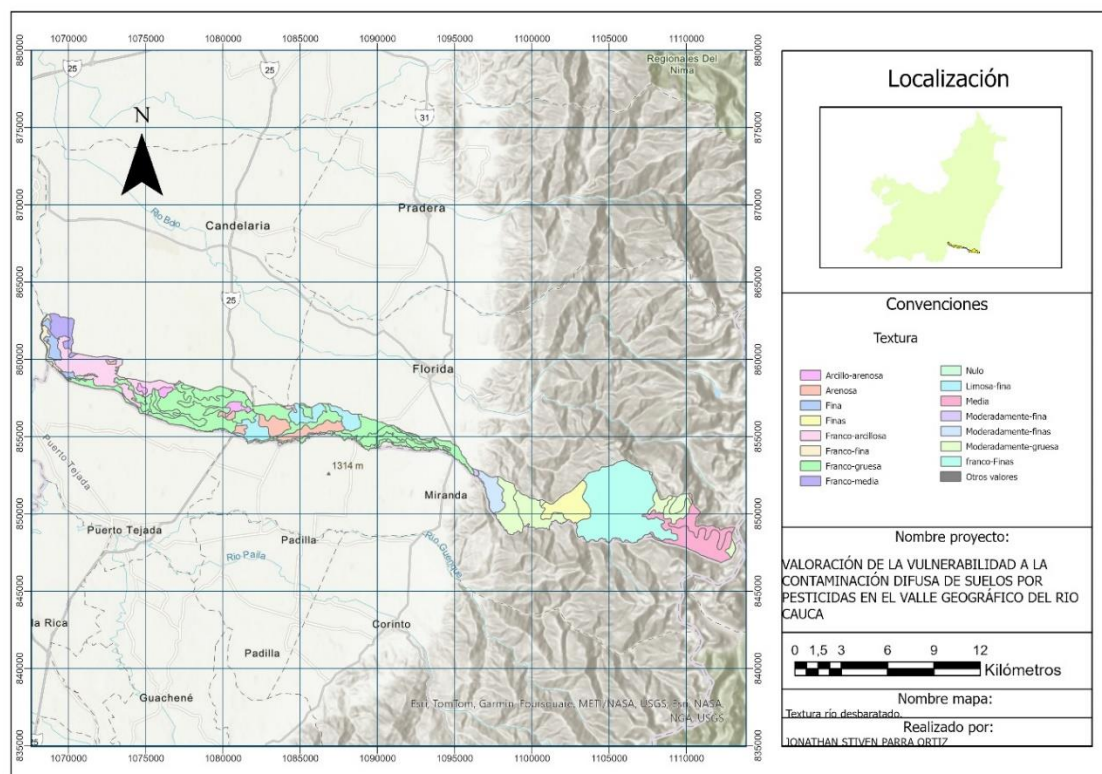
En la zona plana, ubicada al oeste de la cuenca, los niveles de materia orgánica indican una vulnerabilidad baja a la contaminación por pesticidas. En contraste, en la zona de relieve situada al este, se registran valores de vulnerabilidad alta. Información proporcionada por entidades públicas revela que en la parte plana se lleva a cabo una incorporación periódica de materia orgánica, como restos vegetales. Este proceso no solo contribuye a la producción sostenible de alimentos en la zona, sino que también ayuda a mantener niveles adecuados de materia orgánica en el suelo, lo que a su vez reduce la vulnerabilidad ante la contaminación por pesticidas.

Es bueno recordar que la relación entre los niveles de materia orgánica y la capacidad de intercambio catiónico es crucial para entender la dinámica de fertilidad y la susceptibilidad del suelo a la contaminación. La adición constante de materia orgánica mejora la estructura del suelo, incrementa su capacidad de retención de nutrientes y agua, y disminuye la movilidad de los pesticidas, reduciendo así el riesgo de contaminación.

- **5.4 Obtención de los mapas de textura de la cuenca del río Desbaratado**

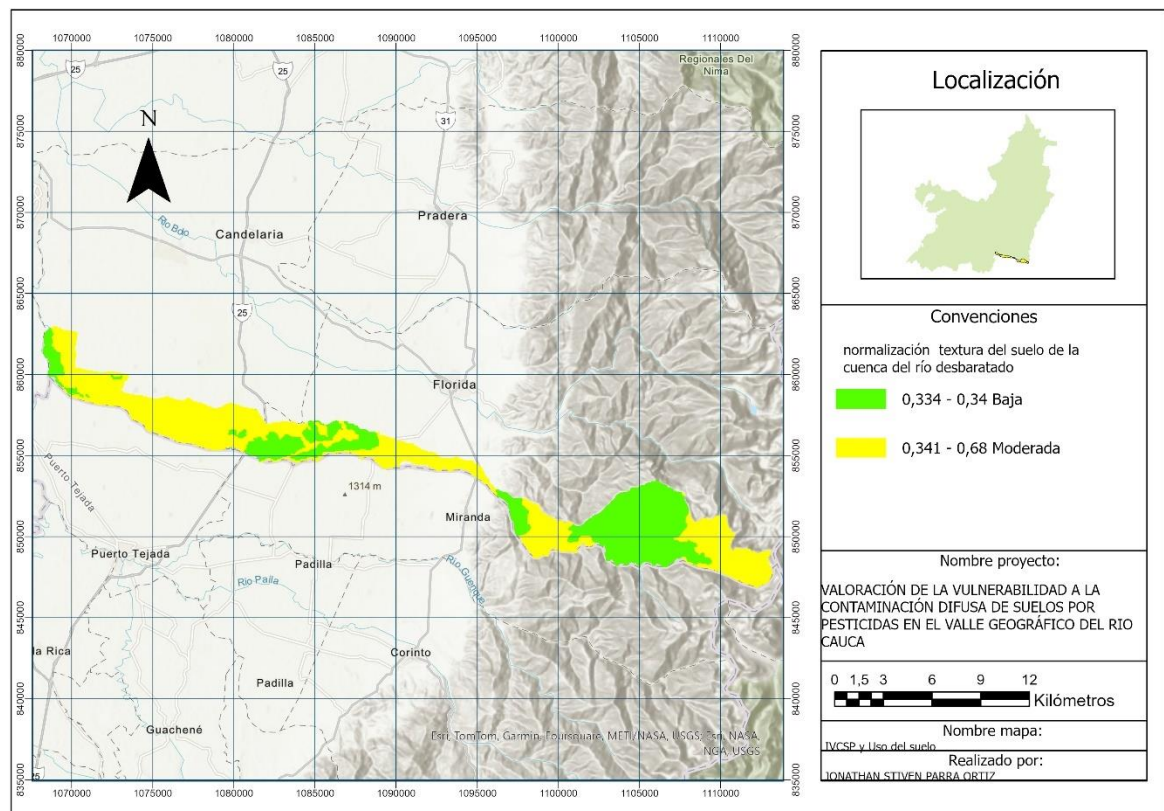
A través de la página GeoCVC, se adquirió un mapa de polígonos con información textural de suelos, identificada mediante códigos de clasificación del suelo provenientes del estudio “Levantamiento de suelos y zonificación de tierras del departamento de Valle del Cauca” del IGAC. Basándose en este documento, se obtuvieron los valores de textura de dichos polígonos de manera cualitativa. Utilizando la tabla disponible en el Convenio Interadministrativo 081 de 2021 (CVC-UNIVALLE, 2021), se lograron generar valores normalizados de textura, transformando la información cualitativa en valores cuantitativos. Esta normalización es esencial para convertir las categorías texturales en datos numéricos estandarizados, permitiendo su uso en análisis espaciales. Los valores resultantes de esta transformación se observan en la Figura 11.

Figura 11. Valores de textura formato poligonal de la cuenca del río Desbaratado.



Con los valores normalizados de textura, y apoyándonos nuevamente en la herramienta “Feature to Raster” de ArcGIS, se generó un mapa de textura normalizado. Esta herramienta es fundamental para transformar datos vectoriales en una capa ráster, lo que permite representar la información en formato de píxeles, asignando a cada píxel un valor específico de textura correspondiente a su ubicación.. El resultado de este proceso se presenta en la Figura 12. La utilización de herramientas avanzadas de SIG, como ArcGIS, asegura que la conversión de datos texturales a formato ráster sea precisa y eficaz. Esto permite una evaluación detallada y exacta de la variabilidad textural del suelo, esencial para el cálculo de índices de vulnerabilidad del suelo, como el Índice de Vulnerabilidad del Suelo a la Contaminación por Pesticidas (IVCSP).

Figura 12. Valores de textura rasterizados y normalizados de la cuenca del río Desbaratado.

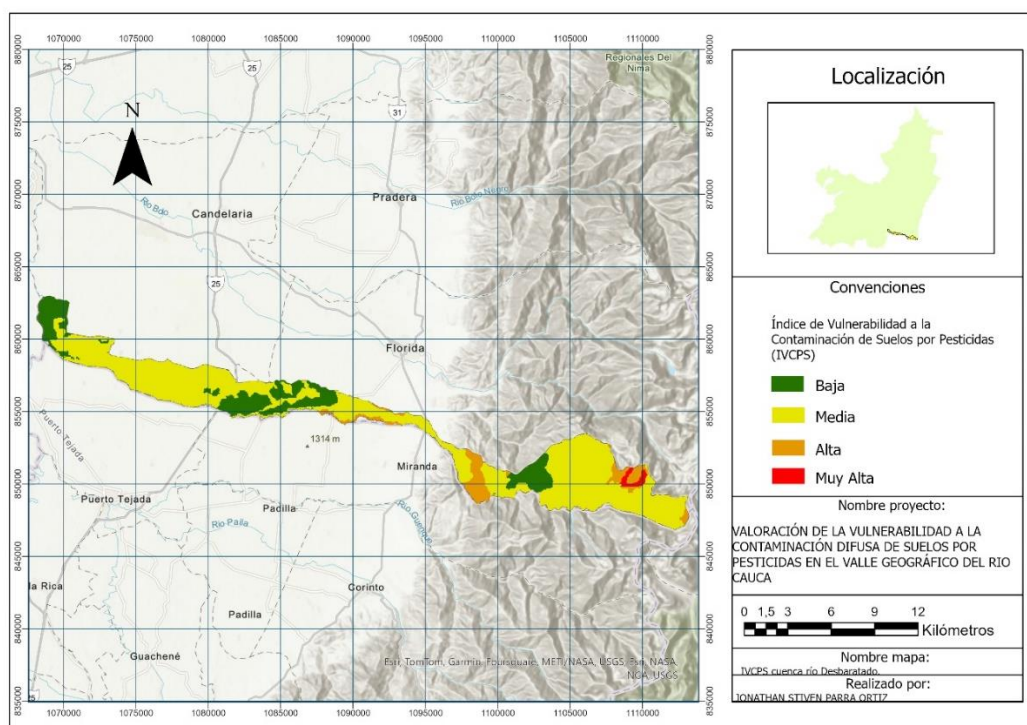


Como era previsible, el análisis del mapa de textura del suelo revela una marcada heterogeneidad en las características texturales del terreno. Sin embargo, al proceder a la normalización de acuerdo con las pautas establecidas en el Convenio Interadministrativo 081 de 2021 (CVC-UNIVALLE, 2021), se observa que las vulnerabilidades resultantes son predominantemente bajas o moderadas en toda la cuenca del río Desbaratado, sin distinción entre la zona de relieve y la zona plana. Esta uniformidad en los niveles de vulnerabilidad podría significar una modificación significativa en la vulnerabilidad total calculada mediante el “IVCSP”, ya que influencia áreas previamente identificadas como de alta vulnerabilidad debido al CIC o la materia orgánica.

- **5.5 Cálculo del índice de vulnerabilidad del suelo a la contaminación por pesticidas (IVCSP) de la cuenca del río Desbaratado**

La evaluación del índice de vulnerabilidad del suelo a la contaminación por pesticidas requiere que los cuatro parámetros críticos de la fórmula “IVCSP” estén previamente normalizados y en formato ráster. Por ello, es fundamental realizar estos procesos antes de generar un mapa de vulnerabilidad. Para crear este mapa, se utilizó la herramienta “Calculadora Ráster”, la cual permitió asignar un peso específico a cada parámetro de acuerdo con lo establecido en el Convenio Interadministrativo 081 de 2021 (CVC-UNIVALLE, 2021). En esta ponderación, se otorgó mayor relevancia al parámetro de capacidad de intercambio catiónico, con un peso de 0.301 en la suma, mientras que el pH recibió un valor menor de 0.151. Este método asegura que los factores más influyentes en la susceptibilidad del suelo a la contaminación por pesticidas se evidencien con precisión en el análisis espacial, proporcionando una representación fiel y funcional para la gestión. Los resultados se pueden observar en la figura 13.

Figura 13. Cálculo del índice de vulnerabilidad a la contaminación del suelo por pesticidas en la cuenca del río Desbaratado.



El cálculo del “IVCSP” evidencia que la mayor parte de la cuenca exhibe una vulnerabilidad media, seguida de niveles de vulnerabilidad baja, alta y muy alta. Aproximadamente el 73% del área de la cuenca se encuentra en un estado de vulnerabilidad media, lo que equivale alrededor de 12.166 hectáreas de territorio. En segundo lugar, un 19% de la cuenca presenta vulnerabilidad baja, abarcando una extensión de aproximadamente 3.169 hectáreas. Por otro lado, el porcentaje de área con vulnerabilidad alta constituye el 7% de la cuenca, representando 1.168 hectáreas. Finalmente, solo un 1% de la cuenca muestra vulnerabilidad muy alta, lo que equivale a unas 167 hectáreas. Estos resultados cuantitativos proporcionan una visión detallada de la distribución espacial de la vulnerabilidad en la cuenca del río Desbaratado, lo que permite identificar áreas prioritarias para la implementación de medidas de manejo y conservación de suelo.

El análisis de los resultados del Índice de Vulnerabilidad de la Cuenca al uso de Pesticidas (IVCSP) y su correlación con los mapas previos evidencia que la materia orgánica y la capacidad de intercambio catiónico (CIC) son los dos factores predominantes que han incidido significativamente en el resultado final. Estos elementos han contribuido a identificar zonas inicialmente consideradas con una amenaza alta, las cuales, al ser evaluadas junto con otros factores, han culminado con una calificación de amenaza alta o muy alta. En contraposición, el factor de textura del suelo ha desempeñado un papel crucial al reducir la vulnerabilidad en varias zonas. Por ejemplo, áreas previamente clasificadas con una vulnerabilidad alta han experimentado una disminución a nivel medio, gracias a las características de textura del suelo.

Aunque el pH ha ejercido influencia en mantener la vulnerabilidad alta en ciertos sectores de la cuenca, su impacto no supera el generado por la materia orgánica o la capacidad de intercambio catiónico. Estos últimos, cabe destacar, están estrechamente vinculados con la fertilidad de los suelos, lo que subraya su importancia en la evaluación de la vulnerabilidad del suelo a la contaminación por pesticidas y en la planificación de estrategias de manejo y conservación. Este análisis integral permite comprender mejor los factores que influyen en la

vulnerabilidad del suelo y proporciona información valiosa para la toma de decisiones en la gestión ambiental y el desarrollo sostenible de la cuenca del río Desbaratado.

Con conocimiento previo de que la cuenca está dividida en una región plana y una región de relieve, era previsible que la zona situada en la parte plana de la cuenca presentara niveles superiores de vulnerabilidad debido a su enfoque productivo.

Sin embargo, al observar que los valores del índice en esta área fueron inferiores a los anticipados, se evidencia la necesidad de incluir más variables al calcular este índice para obtener resultados más precisos. Algunas variables faltantes podrían ser los óxidos metálicos en estado libre, los cuales también afectan la movilización de pesticidas orgánicos en los suelos (Khan. et al., 1988), la profundidad efectiva la cual juega un papel crucial en la mitigación de la contaminación por pesticidas, Una mayor profundidad efectiva del suelo puede ayudar a reducir la lixiviación de pesticidas hacia las capas más profundas, ya que proporciona una mayor cantidad de material que actúa como una barrera física. A medida que los pesticidas se infiltran, el suelo más profundo ofrece más oportunidades para que las sustancias sean retenidas, degradadas o absorbidas por la materia orgánica y las partículas minerales antes de alcanzar las capas subterráneas. Esto disminuye la velocidad de filtración, permitiendo que los contaminantes se distribuyan de manera más controlada y reduciendo el riesgo de contaminación de aguas subterráneas. igualmente, otro factor a tener en cuenta es la capacidad de intercambio Aniónico (CIA), ya que permite al suelo retener y adsorber iones y moléculas cargadas negativamente, incluidos los pesticidas. Otro aspecto crucial es la conductividad eléctrica la cual desempeña un papel clave en la prevención de la contaminación por pesticidas. Una conductividad eléctrica adecuada indica el nivel de sales solubles y iones presentes en el suelo, lo cual afecta directamente la movilidad y la retención de pesticidas aplicados (Tangara, 2010)

Por último, el factor uso del suelo, dado que la vulnerabilidad varía en función del cultivo, ya que la vulnerabilidad no es la misma entre un suelo cubierto por un bosque y uno destinado a cultivos como la caña de azúcar. La escasez de diversidad en monocultivos altera el equilibrio natural del suelo y, por ende, puede aumentar su susceptibilidad a los pesticidas,

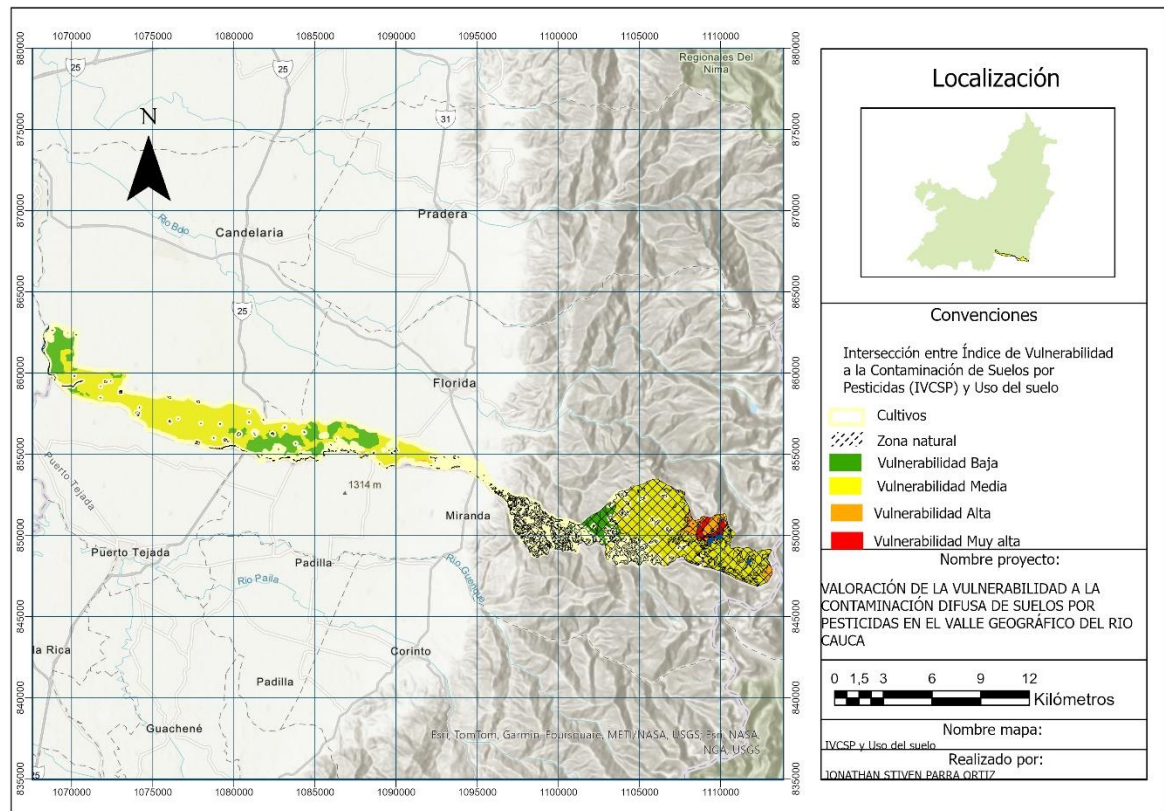
especialmente en combinación con la reducción de materia orgánica, acidificación del suelo y salinización asociadas a prácticas agrícolas deficientes. Por lo tanto, este factor debería ser considerado en el índice, asignando ponderaciones según el tipo de cobertura del suelo: cultivo, bosque mixto o superficie artificial.

- **5.6 Comparación entre índice de vulnerabilidad del suelo a la contaminación por pesticidas (IVCSP) y Uso del suelo de la cuenca del río Desbaratado**

En la figura 14 se presenta una comparación entre el índice de vulnerabilidad a la contaminación del suelo por pesticidas y el uso del suelo en la cuenca del río Desbaratado. Este análisis muestra que la zona plana está mayoritariamente ocupada por cultivos, con la caña de azúcar como el cultivo principal. Esta representa el 48% del total de la cuenca y el 82% de la superficie destinada a actividades agrícolas.. Este mapa de vulnerabilidad es crucial, ya que permite a los agricultores y a las entidades públicas tomar decisiones informadas sobre la gestión del suelo. Aunque no se identifican áreas de alta vulnerabilidad en esta zona plana, es necesario prestar atención a las áreas con vulnerabilidad media, que constituyen más del 70% de esta región.

En contraste, la zona de relieve muestra una alta presencia de arborización, con un bosque mixto, arbustal, matorral denso de tierra firme y bosque de guadua que cubre el 97% de esta área. Aquí se encuentran los niveles más altos de vulnerabilidad, pero debido a las características no productivas de esta zona, se puede evitar la implementación de actividades de recuperación intensiva. Sin embargo, si se decide cambiar el uso del suelo en esta zona, es esencial proceder con cautela y obtener la aprobación de las entidades correspondientes. Un caso especial se encuentra en la parte baja de la zona de relieve, donde predominan los bosques densos, pero también hay pequeñas áreas planas de diversos cultivos, mayoritariamente misceláneo de árboles y cítricos. Esta área presenta un alto riesgo si no se implementan prácticas agrícolas adecuadas o si no se apoyan con métodos de recuperación

Figura 14. Comparación entre índice de vulnerabilidad del suelo a la contaminación por pesticidas (IVCSP) y uso del suelo de la cuenca del río Desbaratado.



La tabla 3 facilita el análisis de resultados, presentando el tipo de cobertura existente en la cuenca del río Desbaratado y la vulnerabilidad asociada a dicha cobertura, además del porcentaje que representa.

Tabla 3. Nivel de vulnerabilidad asociada al tipo de cobertura en la cuenca del río Desbaratado.

Codigo cobertura	Nombre cobertura	Categoría de vulnerabilidad	Porcentaje	Shape_Leng	Area
12111	Superficies artificial	Baja	0,07%	2599,99219	62238,2509
12211	Otras superficies art	Baja	0,14%	3588,88658	164091,169
21221	Misceláneo de arbol	baja	0,42%	20276,0146	468754,5
23119	Tabaco	baja	0,18%	2559,96574	183591,128
23131	Sorgo	baja	0,03%	2419,03577	33236,3674
23162	Pasto de corte arbol	baja	0,22%	6296,91635	237674,254
23221	Habichuela	baja	0,08%	3501,62912	88199,6276
11111	Zonas urbanas conti	Media	0,16%	4128,93674	173972,274
21114	Guayabo	Media	0,02%	931,952564	20918,5777
21120	Eucalipto	Media	0,26%	6865,63142	261399,425
21142	Café- Otros arboreos	Media	0,01%	556,219478	7202,16428
21230	Misceláneo de cítricos	Media	0,04%	2095,20223	35362,9931
22115	Ciruelo	Media	0,24%	12748,639	255675,497
22122	Café-Plátano	Media	0,16%	6071,46984	168373,107
22131	Cacao	Media	0,22%	8252,31793	239156,151
22171	Caña de Azúcar	Media	48,38%	110863,324	51052913,7
22181	Maíz	media	0,50%	19716,5252	531304,8
22191	Algodón	Media	0,00%	466,758612	6067,97964
22212	Yuca	media	0,00%	412,42353	6636,39271
23141	Soya	Media	0,00%	445,963124	10068,0062
23218	Tomate	Media	0,00%	368,593502	6264,82393
23231	Maracuyá	media	0,00%	284,794415	4572,0823
24113	Tomate-Habichuela	media	0,01%	439,29123	6309,95915
24121	Yuca-platano	Media	0,02%	1119,95796	21254,078
24122	Citricos-Platano	Media	0,05%	3195,89422	57958,9244
31352	Bosque de guadua	media	0,55%	38158,4679	587534,612
32110	Arbustal y matorral	media	2,47%	104255,031	2547530,65
35221	Areas naturales den	media	0,14%	7737,15626	149000,035
41120	Rios	media	0,22%	35924,792	217773,06
22113	Plátano	Alta	0,80%	26875,0406	811662,813
22121	Café	Alta	0,17%	7398,22843	203168,43
23170	Pasto cultivado	Alta	6,97%	232171,87	7373025,22
31111	Bosque mixto denso	alta	26,78%	319371,939	28290798,5
41220	Estanques artificiales	alta	0,52%	19396,758	539168,328
33240	Herbezal natural ab	muy alta	10,13%	151205,608	10647012,7
41410	Arenal	muy alta	0,01%	741,092925	6272,49485

Fuente: Elaboración Propia.

Como se puede apreciar en la figura 14 y la tabla 3, donde se contrasta índice de vulnerabilidad del suelo a la contaminación por pesticidas (IVCSP) con el tipo de uso del suelo en la cuenca del río Desbaratado, los resultados arrojados indican una alta vulnerabilidad en áreas donde la cobertura está íntimamente ligada a la naturaleza, como bosques mixtos o

herbazales, en comparación con zonas de vulnerabilidad media, como los cultivos específicamente de caña de azúcar.

- **5.7 Identificación de acciones que reduzcan la vulnerabilidad del suelo a la contaminación difusa por pesticidas en la cuenca del río Desbaratado**

Tras una detallada investigación, Según Norris y Shankle (2021), han identificado acciones clave para reducir la vulnerabilidad del suelo a la contaminación difusa. A través de la recopilación y análisis de información documental, se encontró que los cultivos de cobertura y los abonos verdes son soluciones efectivas para mitigar la contaminación del suelo por pesticidas. Estas prácticas no solo mantienen la fertilidad del suelo y mejoran su estructura, sino que también promueven la biodiversidad, reduciendo así la necesidad de pesticidas químicos. Además, los abonos verdes enriquecen el suelo con nutrientes como nitrógeno, potasio y fósforo, mejorando la calidad del suelo y la salud de los cultivos. Estos hallazgos son respaldados por estudios como los realizados por ATTRA FAO (Lista de Recursos: Cómo Reducir el Uso de Fertilizantes Sintéticos, 2024) y el Simposio Global sobre Contaminación del Suelo (GSOP18) (De las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura, 2019).

Otra de las acciones clave identificadas, gracias a los investigadores de la Universidad de Costa Rica (UCR), quienes están comprometidos en reducir el uso de pesticidas en la agricultura debido a sus impactos negativos en la salud humana y el medio ambiente, es la capacitación de agricultores y comunidades en la reducción de la contaminación agrícola. El CICA (Sistema de captura de información catastral alfanumérica) ha desarrollado programas de formación que se centran en la promoción de prácticas agrícolas sostenibles, con el objetivo de minimizar el uso de químicos tóxicos y fomentar métodos más naturales de control de plagas. Estas capacitaciones no solo benefician a los agricultores, sino que también involucran a organizaciones de la sociedad civil y del sector privado, creando un enfoque integral y comunitario en la lucha contra la contaminación agrícola (O'Neal Coto, 2015).

Otra actividad importante en este ámbito es la labranza de conservación, explicada por el Dr. Vasyl Cherlinka. Esta práctica agrícola desempeña un papel crucial en la protección del suelo contra la contaminación por pesticidas. Al minimizar la perturbación del suelo, esta técnica preserva su estructura y la materia orgánica, favoreciendo la formación de agregados estables que reducen la erosión y el escurrimiento superficial. Como resultado, la labranza de conservación fomenta la actividad biológica en el suelo, promoviendo la descomposición microbiana de residuos de pesticidas y su posterior degradación en compuestos menos tóxicos. Esta práctica, combinada con la cobertura vegetal, crea una barrera natural que retiene y degrada los pesticidas, contribuyendo así a la sostenibilidad del ecosistema agrícola y a la reducción de la contaminación ambiental (Cherlinka, 2022).

Finalmente, el aporte de materia orgánica al suelo ha sido identificado como una estrategia efectiva para reducir la contaminación por pesticidas, ya que aumenta la capacidad del suelo para degradar compuestos químicos como clorofenoles y cloroanilinas. La incorporación de enmiendas orgánicas como compost, estiércol, fertilizantes verdes, biochar y turba no solo mejora la estructura y la fertilidad del suelo, sino que también potencia la actividad microbiana, lo que acelera la descomposición de pesticidas y fumigantes. Esta actividad microbiana incrementada reduce la volatilización de estos compuestos, minimizando su liberación al ambiente. Además, la materia orgánica en el suelo actúa como un agente adsorbente, facilitando la retención de sustancias peligrosas como los plaguicidas y evitando que se desplacen a través del perfil del suelo hacia las aguas subterráneas. Por otro lado, los fertilizantes orgánicos, al ser de origen carbonado, liberan nutrientes de manera gradual, lo que permite una absorción más eficiente por parte de las plantas. Este proceso no solo mejora la nutrición vegetal, sino que también contribuye a una menor acumulación de contaminantes en el suelo, reduciendo el riesgo de contaminación ambiental (Julca-Otiniano et al., 2006)

Al analizar las acciones clave para reducir la contaminación difusa del suelo, es crucial adoptar un enfoque más preciso y específico según el nivel de contaminación presente. Para áreas con contaminación baja, se pueden implementar prácticas como el cultivo de cobertura

y el uso de abonos verdes, que ayudan a mejorar la calidad del suelo y prevenir la erosión. En zonas con contaminación media donde se realiza producción agrícola, es necesario combinar estas prácticas con la capacitación de agricultores en técnicas de labranza de conservación y el aporte de materia orgánica. Esto puede aumentar la capacidad del suelo para retener nutrientes y reducir la dispersión de contaminantes. Finalmente, en áreas con alta contaminación, se requiere una intervención más robusta. Deberíamos considerar una combinación de todas las actividades propuestas si se trata de una zona cultivada. En caso contrario, como ocurre en el río Desbaratado, si hay procesos de salinización, se debe recuperar la zona mediante lavado y el uso de tecnologías avanzadas de desalinización. Esto requiere un estudio más preciso de la zona en la que se desea trabajar. Este enfoque diferenciado asegura que las soluciones sean efectivas y adecuadas para cada situación específica, optimizando los recursos.

6. Conclusiones

La presente investigación ha abordado de manera técnica la evaluación de la vulnerabilidad a la contaminación difusa de suelos por pesticidas en la cuenca del río Desbaratado. Se utilizó el Índice de Vulnerabilidad a la Contaminación de Suelos por Pesticidas (IVCPS) para correlacionar los niveles de vulnerabilidad con las coberturas del suelo y para identificar acciones concretas para mitigar dicha vulnerabilidad. Sin embargo, no se tuvieron en cuenta ámbitos como el socioeconómico, cultural e institucional, por lo que se invita a expandir este tipo de investigaciones para incluir estas dimensiones y enriquecer la comprensión del problema y sus dinámicas en la región. Los hallazgos obtenidos ofrecen una visión integral sobre los factores que influyen en la vulnerabilidad del suelo a la contaminación y proponen medidas prácticas para su gestión sostenible. A continuación, se presentan las conclusiones detalladas para cada uno de los objetivos específicos planteados en esta investigación.

Conclusión OE1. La aplicación del Índice de Vulnerabilidad a la Contaminación de Suelos por Pesticidas (IVCPS) en la cuenca del río Desbaratado proporcionó una estimación precisa y detallada de los niveles de vulnerabilidad de los suelos a la contaminación por pesticidas; sin embargo, es importante señalar que esta información es de hace 20 años y debe considerarse como una imagen del estado del suelo en ese momento. Esto implica que las condiciones actuales del suelo pueden haber cambiado significativamente. Este índice, que toma en cuenta factores críticos como la textura del suelo, el contenido de materia orgánica, pH y la capacidad de intercambio catiónico, mostró que la mayoría de los suelos en la cuenca presentan una vulnerabilidad que varía de media a alta. Específicamente, los suelos con textura arenosa, bajo contenido de materia orgánica y menor capacidad de intercambio catiónico se identificaron como los más vulnerables. La implementación de este índice proporcionó un mapa de vulnerabilidad que es esencial para identificar las áreas prioritarias para intervenciones de manejo y monitoreo. Estos resultados no solo resaltan la necesidad de una gestión integral y sostenible del suelo, sino que también subrayan la importancia de políticas ambientales que consideren la variabilidad espacial de la vulnerabilidad del suelo.

La aplicación del IVCPS en esta cuenca ofrece una herramienta valiosa para los tomadores de decisiones, permitiéndoles desarrollar estrategias específicas para mitigar la contaminación por pesticidas y proteger los recursos del suelo.

Conclusión OE2. La correlación entre los niveles de vulnerabilidad a la contaminación por pesticidas y las coberturas del suelo en la cuenca del río Desbaratado mostró resultados contradictorios y no cumplió completamente con el objetivo trazado. Se esperaba que los suelos agrícolas presentaran una mayor vulnerabilidad debido a la aplicación de pesticidas y su ubicación en planicies, donde los nutrientes y pesticidas tienden a acumularse. Sin embargo, el análisis reveló que los suelos agrícolas mostraron una vulnerabilidad media, mientras que los suelos con cobertura boscosa, ubicados principalmente en laderas, presentaron una vulnerabilidad alta o muy alta.

Este resultado inesperado indica que el Índice de Vulnerabilidad a la Contaminación de Suelos por Pesticidas (IVCPS) utilizado no es suficientemente preciso, ya que no considera factores clave como la cobertura del suelo (agrícola o bosque).

La discrepancia entre las expectativas y los resultados obtenidos subraya la necesidad de mejorar el índice de vulnerabilidad para que sea más representativo de las condiciones reales del suelo. Es fundamental que futuras versiones del índice incluyan una gama más amplia de factores, como la cobertura del suelo y la pendiente, para proporcionar una evaluación más precisa y fiable de la vulnerabilidad a la contaminación por pesticidas. Además, esta investigación destaca la importancia de validar los índices de vulnerabilidad con datos empíricos y ajustar los modelos según las características específicas de la región de estudio. Así, aunque se logró una correlación entre los niveles de vulnerabilidad y las coberturas del suelo, la falta de precisión del índice utilizado y la discrepancia en los resultados obtenidos con respecto a las expectativas originales indican la necesidad de una revisión y mejora del índice de vulnerabilidad para que pueda ser una herramienta verdaderamente útil en la planificación y gestión de los suelos agrícolas y forestales.

Conclusión OE3. La identificación de acciones para disminuir la vulnerabilidad a la contaminación difusa del suelo por el uso de pesticidas en la cuenca del río Desbaratado

resultó en una serie de recomendaciones prácticas y específicas, fundamentadas en los hallazgos de la investigación. Las acciones propuestas incluyen la adopción de cultivos de cobertura y abonos verdes, que mejoran la estructura del suelo, aumentan el contenido de materia orgánica y reducen la erosión, contribuyendo así a una menor movilidad y mayor retención de pesticidas en el suelo. Además, se recomienda la implementación de prácticas de agricultura de conservación, como la labranza reducida o cero labranzas, que ayudan a mantener la estructura del suelo y su capacidad de retención de agua y nutrientes. También se destaca la importancia del monitoreo constante de la calidad del suelo, lo cual permitirá detectar cambios en los niveles de contaminación y ajustar las prácticas de manejo en consecuencia. La educación y capacitación de los agricultores locales sobre el uso racional y seguro de pesticidas y la adopción de prácticas agrícolas sostenibles son cruciales para el éxito de estas medidas. Estas acciones, cuando se implementen de manera integral, no solo reducirán la vulnerabilidad a la contaminación por pesticidas, sino que también promoverán la salud del suelo, mejorarán la productividad agrícola y contribuirán a la sostenibilidad ambiental de la cuenca del río Desbaratado. Las recomendaciones presentadas ofrecen una guía concreta para los gestores del territorio y los agricultores, facilitando la transición hacia prácticas agrícolas más sostenibles y menos contaminantes.

En resumen, la investigación realizada en la cuenca del río Desbaratado fue de carácter exploratorio y evidenció la necesidad de continuar trabajando en el Índice de Vulnerabilidad a la Contaminación de Suelos por Pesticidas (IVCPS). Aunque se logró una comprensión inicial de la vulnerabilidad de los suelos a la contaminación por pesticidas, así como la propuesta de acciones específicas para mitigar esta vulnerabilidad, los hallazgos indican que se requiere un enfoque más profundo y continuo para evaluar y actualizar el índice empleado. Las conclusiones obtenidas destacan la importancia de aplicar herramientas de evaluación como el IVCPS, comprender las interrelaciones entre coberturas del suelo y vulnerabilidad, y adoptar prácticas de manejo sostenible que reduzcan el impacto de los pesticidas en el medio ambiente. La implementación de estas estrategias no solo contribuirá a la conservación de los suelos y la mejora de la calidad ambiental, sino que también apoyará la sostenibilidad y

productividad agrícola a largo plazo. Este estudio ofrece una base sólida para futuras investigaciones y acciones políticas orientadas a la protección y gestión sostenible de los suelos en contextos agrícolas similares.

7. Recomendaciones

El cálculo del índice demostró que el 81%, de la cuenca se encuentra con la vulnerabilidad media o superior, dentro de este porcentaje el 61% pertenece a cultivos, esto indica que existe una gran posibilidad de que, en suelos utilizados para agricultura, se encuentren contaminados por pesticidas. Dada esta situación, es recomendable iniciar procesos de recuperación de estos suelos. Antes de implementar la fitorremediación, es crucial evaluar si existe contaminación y qué tipos de contaminantes están presentes. Una vez identificados, se puede definir la estrategia de fitorremediación más adecuada. Otra alternativa efectiva es la biorremediación, que emplea microorganismos como bacterias y hongos para descomponer residuos de pesticidas. La aplicación de materia orgánica, como compost y abonos orgánicos, también se recomienda para mejorar la estructura del suelo, aumentar su capacidad de retención de agua y nutrientes, y favorecer la actividad microbiana que degrada los pesticidas. Además, es crucial implementar un monitoreo continuo y un manejo integrado del suelo, incluyendo prácticas de conservación y técnicas agrícolas sostenibles, para evaluar y mejorar la calidad del suelo y agua subterránea afectada por pesticidas.

8. Bibliografía

- Aguilera, D. (2017). Análisis del comportamiento de persistencia en suelos de agroquímicos usados en cultivo de fresa en Facatativá Cundinamarca. Universidad Militar Nueva Granada. Recuperado de <https://repository.unimilitar.edu.co/bitstream/handle/10654/16946/AguileraBernalDianaKatherine2017.pdf?sequence=1&isAllowed=y>.
- Aparicio, V. (2015). Los plaguicidas agregados al suelo y su destino en el ambiente. INTA Ediciones, 53(9), 1689–1699.
- Arias-Estévez, M., López-Periago, E., Martínez-Carballo, E., Simal-Gándara, J., Mejuto, J. C., & García-Río, L. (2008). The mobility and degradation of pesticides in soils and the pollution of groundwater resources. *Agriculture, Ecosystems and Environment*, 123(4), 247–260. <https://doi.org/10.1016/j.agee.2007.07.011>.
- Barbosa Rodríguez, C. (2007). Influencia de la composta MiyaOrganic® en la resistencia al corte de un suelo [Tesis de pregrado, Universidad Autónoma Agraria “Antonio Narro”]. Recuperado de <http://repositorio.uaaan.mx:8080/xmlui/bitstream/handle/123456789/1903/T15956%20BARBOSA%20RODRIGUEZ%2C%20CESAR%20%20TESIS.pdf?sequence=1&isAllowed=y>.
- Burbano-Orjuela, H. (2016). El suelo y su relación con los servicios ecosistémicos y la seguridad alimentaria. *Revista de Ciencias Agrícolas*, 33(2), 117-124. <https://doi.org/10.22267/rcia.163302.58>.
- Cherlinka, V. (2022). Labranza de conservación para proteger el suelo. EOS DATA ANALYTICS. Recuperado de <https://eos.com/es/blog/labranza-de-conservacion/>.
- CIIFEN & CRC OSA. (2022). Aproximación para el cálculo de riesgo. CIIFEN. Recuperado de <https://ciifen.org/definicion-de-riesgo/>.
- Congreso de la República de Colombia. (2012). Ley 1523 de 2012.

- Comisión Interamericana de Derechos Humanos. (2009). Informe Anual 2009. Recuperado de <https://cidh.oas.org/annualrep/2009sp/indice2009.htm>
- Corporación Autónoma Regional del Valle del Cauca & Universidad del Valle. (2021). Convenio interadministrativo 081 de 2021: Actividad 1: Evaluación de la contaminación difusa en el suelo por agroquímicos, fertilizantes orgánicos y de síntesis química.
- CVC. (2017). Balance oferta – demanda de agua cuenca del río Desbaratado. Recuperado de https://www.cvc.gov.co/sites/default/files/2018-09/Balance_Desbaratado_0.pdf.
- De las Naciones Unidas Para la Alimentación y la Agricultura, O. (2019). La contaminación del suelo: una realidad oculta. Food & Agriculture Org.
- Domínguez Gual, M. C. (2015). La contaminación ambiental, un tema con compromiso social. *Producción + Limpia*, 10(1), 9-21. Recuperado de http://www.scielo.org.co/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1909-04552015000100001&lng=en&tlng=es.
- Echeverri Sánchez, A. F., Urrutia Cobo, N., & Barona Ramírez, S. M. (2020). Vulnerabilidad de fuentes hídricas superficiales de la cuenca del río Cerrito a la contaminación difusa agrícola. *Revista de Investigación Agraria y Ambiental*, 11(2), 117 -130. <https://doi.org/10.22490/21456453.3136>.
- Echeverri-Sánchez, A. (2022). Metodological proposal to assess the vulnerability of soils to salinization in flat area irrigation districts. *Revista Ingenierías Universidad de Medellín*, 21(40), 28-43. Epub October 31, 2022. <https://doi.org/10.22395/rium.v21n40a3>.
- Espinosa, A., & Barba, A. (2014). Reseña histórica de la problemática de contaminación por agroquímicos y mecanismos de regulación en Panamá. *Visión Antataura*, 2(1), 37-48. Recuperado de <https://revistas.up.ac.pa/index.php/antataura/article/view/154/132>.

- FAO - Food and Agriculture Organization of the United Nations. (2015). Carta mundial de los suelos. Recuperado de <http://www.fao.org/3/b-i4965s.pdf>.
- FAO - Food and Agriculture Organization of the United Nations. (2021). Sources of soil pollution and major contaminants in agricultural areas. Recuperado de <https://www.fao.org/3/cb4894en/online/src/html/chapter-03-3.html>.
- FAO - Food and Agriculture Organization of the United Nations. (2022). Salvar nuestros suelos de todas las maneras terrenales posibles. Recuperado de <https://www.fao.org/fao-stories/article/es/c/1599361/>.
- Gómez, J. (2001). Vulnerabilidad y medio ambiente. Comisión Económica para América Latina y el Caribe (CEPAL).
- Guevara-Vega, E. M. D., Delgado-Deza, J. R., & Mendoza-de-los-Santos, A. C. (2023). Vulnerabilidades y amenazas en los activos de información: una revisión sistemática. Revista Científica de Sistemas e Información, 3(1), e461. <https://doi.org/10.51252/rcsi.v3i1.4611>
- Fernández, N., Viciano, V., & Drovandi, A. (2003). Valoración del impacto ambiental total por agroquímicos en la cuenca del río Mendoza. Proyecto OEI/DGI. Recuperado de <https://www.ina.gob.ar/archivos/pdf/CRA-IIIFERTI/CRA-RYD-6-Fernandez.pdf>.
- Hermosín, M. C. (1978). Estudio de la adsorción del pesticida clordimeform por minerales de la arcilla. Universidad de Sevilla.
- Julca-Otiniano, A., Meneses-Florián, L., Blas-Sevillano, R., & Bello-Amez, S. (2006). La materia orgánica, importancia y experiencia de su uso en la agricultura. Idesia, 24(1). <https://doi.org/10.4067/s0718-34292006000100009>.
- Khan, S., Khan, N., & Iqbal, N. (1988). Pesticide mobility in soils as affected by their chemical characteristics and some soil properties. Clay Research, 7, 5-10.
- Lista de recursos: Cómo reducir el uso de fertilizantes sintéticos. (2008). Recuperado de <https://attra.ncat.org/es/caja-de-herramientas-como-reducir-el-uso-de-fertilizantes-sinteticos/>.

- Lugo-Morin, D. R., & Rey, J. C. (2008). Evaluación de la vulnerabilidad a la degradación agroambiental a través del uso del sistema microLEIS en los suelos de los llanos centrales de Venezuela. *Revista internacional de contaminación ambiental*, 25(1), 43-60. Recuperado de http://www.scielo.org.mx/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0188-49992009000100005&lng=es&tlng=es.
- Macías Bravo, J., & Salvatierra Cedeño, C. (2019, noviembre). Presencia de malezas resistentes a herbicidas en el cultivo de *Oryza sativa* L., en tres cantones de Manabí. Escuela Superior Politécnica Agropecuaria de Manabí Manuel Félix López. <http://190.15.136.145/bitstream/42000/1099/1/TTA17.pdf>
- Melgarejo García, J. (2011). Mecanismo de acción de los fungicidas (1.a ed.). Biblioteca Agropecuaria.
- Ministerio de Agricultura. (2021). Informe trimestral del segundo semestre. <https://www.minagricultura.gov.co/noticias/Paginas/El-sector-agropecuario-creci%C3%B3-3,8-en-el-PIB-del-segundo-trimestre-de-2021.aspx>
- Ministerio de Ambiente. (2016). Política de gestión sostenible del suelo. http://www.andi.com.co/Uploads/Pol%C3%ADtica_para_la_gesti%C3%B3n_sostenible_del_suelo_FINAL.pdf
- Ministerio de Protección Social y Ministerio de Vivienda, Ciudad y Territorio. (2017). Resolución 549 DE 2017. <http://www.minvivienda.gov.co/ResolucionesAgua/0549-2017.pdf>
- Morales Vargas, R. (2013). Metodología de análisis del riesgo por contaminación de agroquímicos: Cuenca del Río San Blas, Costa Rica. *Revista Costarricense de Salud Pública*, 22(1), 34-44. http://www.scielo.sa.cr/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1409-14292013000100007&lng=en&tlng=es

- Norris, M. D., & Shankle, R. S. (2021). Strategies for mitigating pesticide contamination in soils: The role of cover crops and green manures. *Journal of Environmental Management*, 289, 112-123. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2021.112123>
- Lince-Salazar, L. A., Sadeghian-Khalajabadi, S., & Díaz-Poveda, V. C. (2021). Soil vulnerability index to climatic variability in coffee regions of Colombia. *Revista de Ciencias Agrícolas*, 38(2), 124-143. <https://doi.org/10.22267/rcia.213802.165>
- O'Neal Coto, K. (2015, 22 julio). Promueven alternativas para reducir uso de plaguicidas. Universidad de Costa Rica. <https://www.ucr.ac.cr/noticias/2015/07/22/promueven-alternativas-para-reducir-uso-de-plaguicidas.html>
- Orozco Corral, A. L., Valverde Flores, M. I., Martínez Téllez, R., Chávez Bustillos, C., & Benavides Hernández, R. (2016). Propiedades físicas, químicas y biológicas de un suelo con biofertilización cultivado con manzano. *Terra Latinoamericana*, 34(4), 441-456. http://www.scielo.org.mx/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0187-57792016000400441&lng=es&tlng=es
- Ou, J., Li, H., Ou, X., Yang, Z., Chen, M., Liu, K., Teng, Y., & Xing, B. (2020). Degradation, adsorption and leaching of phenazine-1-carboxamide in agricultural soils. *Ecotoxicology and Environmental Safety*, 205, 111374. <https://doi.org/10.1016/j.ecoenv.2020.111374>
- Peña, Y. (2019). Destino ambiental de los herbicidas Ametrina y Diurón en suelos de Colombia y España mediante estudios de adsorción y degradación en condiciones de laboratorio. <http://repositorio.unal.edu.co/bitstream/handle/unal/75999/Destino%20ambiental%20de%20los%20herbicidas%20Ametrina%20y%20Diur%C3%B3n.pdf>
- Postma, D. (1994). *Geochemistry, groundwater and pollution*. Rotterdam, Holanda.

- Ramón, J. G., Montserrath, R. V., & Magdaleno, R. T. H. (2015). Efecto de la quema de caña azúcar en las propiedades del suelo en San Luis Potosí, México. <http://sedici.unlp.edu.ar/handle/10915/52158>
- Rojas, L., & Vélez Otálvaro, M. V. (2008). Vulnerabilidad a la contaminación, zona sur acuífero del Valle del Cauca, Colombia. *Boletín de Ciencias de la Tierra*, (23), 69-84. http://www.scielo.org.co/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0120-36302008000200007&lng=en&tlng=es
- Sadeghian, K. (2003). Efecto de la fertilización con nitrógeno, fósforo, potasio y magnesio sobre las propiedades químicas de suelo cultivados en café. *Cenicafe*. <https://biblioteca.cenicafe.org/bitstream/10778/273/1/arc054%2803%29242-257.pdf>
- Silva, G., Lagunes, A., Rodríguez, J., & Rodríguez, D. (2002). Insecticidas vegetales: Una vieja y nueva alternativa para el manejo de plagas. *Manejo Integrado de Plagas y Agroecología*. <https://repositorio.catie.ac.cr/bitstream/handle/11554/6414/A2008e.pdf?sequence=1&isAllowed=y>
- Tangara, E. (2010). Efecto de fertilizantes orgánicos e inorgánicos en las propiedades físicas y químicas del suelo sobre el cultivo de papa (*Solanum tuberosum* L.) en tres comunidades del altiplano central de Bolivia. Universidad Mayor de San Andrés, Facultad de Agronomía, Carrera de Ingeniería Agronómica. <https://repositorio.umsa.bo/bitstream/handle/123456789/9837/T-1443.pdf?sequence=1&isAllowed=y>
- Unidad Central del Valle del Cauca - UCEV, Grupo Educación Ambiental y Participación Ciudadana, & CVC. (2013). Estrategia corporativa de EA para el manejo del suelo. *Estrategia educativo ambiental en suelo*. <https://www.cvc.gov.co/sites/default/files/2020-05/Estraegia%20Corporativa%20de%20EA%20para%20el%20manejo%20del%20suelo.pdf>

- United Nations Human Settlements Programme - UN HABITAT. (2002). Gestión comunitaria de riesgos (L. Salazar, L. Cortez, & J. Mariscal (Eds.); 2do manual). Foro Ciudades para la Vida.
- Valencia Gallego, O., & Rodríguez Zapata, A. (2015). Valoración de la vulnerabilidad a la salinización de los suelos del distrito de riego y drenaje RUT por las prácticas de fertilización. Universidad del Valle.
- Vivas, G. (2020). Efectos de la contaminación por agroquímicos en agua y suelo. <https://repositorio.cientifica.edu.pe/bitstream/handle/20.500.12805/1527/TB-Vivas%20G.pdf?sequence=1&isAllowed=y>