

Estimación de la movilidad de agroquímicos en fuentes de agua aferentes a zonas de cultivo de
café en el municipio de Sotará, Cauca



Maria Valentina Ordoñez Villamarin

Corporación Universitaria Autónoma del Cauca

Escuela Ambiental y Sostenible

Programa de Ingeniería Ambiental y Sanitaria

Popayán – Cauca

2026

Estimación de la movilidad de agroquímicos en fuentes de agua aferentes a zonas de cultivo de
café en el municipio de Sotará, Cauca



Maria Valentina Ordóñez Villamarin

Trabajo de grado modalidad investigación para optar al título de Ingeniera Ambiental y Sanitaria

Director: Ing. MSc. Edwin Fernando Sarria Gaviria

Codirector: PhD César Fernández Morantes

Corporación Universitaria Autónoma del Cauca

Escuela Ambiental y Sostenible

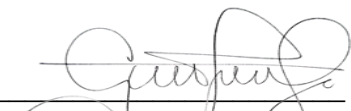
Programa de Ingeniería Ambiental y Sanitaria

Popayán – Cauca

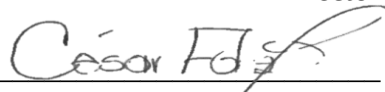
2026

NOTA DE ACEPTACIÓN

Hacemos constar que el presente trabajo de grado titulado “Estimación de la movilidad de agroquímicos en fuentes de agua aferentes a zonas de cultivo de café en el municipio de Sotará, Cauca” ha sido evaluado y aprobado por la Corporación Universitaria Autónoma del Cauca como requisito para optar por el título de Ingeniera Ambiental y Sanitario.



Edwin Fernando Sierra G
Director



César Fernández Morantes
Codirector



Diana Milena Muñoz Solarte
Jurado



Arnol Arias

Popayán Cauca, 2026

Dedicatoria

Dedico esta tesis a Dios, por darme fortaleza y sabiduría para culminar esta etapa. A mis padres, pilares fundamentales en mi vida y merecedores de todos mis logros, quienes con su esfuerzo y sacrificio me han traído hasta aquí, su amor incondicional y su fe inquebrantable han sido la fuerza que me ha sostenido en los momentos difíciles, son mi pilar por el cual hoy se sostiene este logro académico.

A mis hermanos, por su compañía permanente, por su amor, por brindarme ánimo siempre; ellos son mi polo a tierra y un ejemplo a seguir.

Y, de manera muy especial, a mi abuelita, quien desde el cielo sigue iluminando mis pasos; su amor y recuerdo han sido mi fortaleza y esperanza. Este logro lleva consigo su esencia, porque en cada paso que di sentí su presencia guiándome.

A ustedes, que son mi raíz y mi motivo les dedico con profunda gratitud este esfuerzo hecho realidad.

Agradecimientos

Agradezco, en primer lugar, a Dios por darme la capacidad de lograr todo lo que me propongo y la sabiduría necesaria para culminar esta etapa de mi vida.

A mis padres y familia, por su apoyo incondicional, comprensión y motivación constante durante todo este proceso académico.

A mis asesores de tesis, por su orientación, paciencia y valiosos conocimientos, que fueron fundamentales para el desarrollo de este trabajo.

A mis docentes, por compartir su experiencia y contribuir a mi formación profesional.

Finalmente, agradezco a todas las personas que, directa o indirectamente, formaron parte de este logro.

Tabla de contenido

Resumen.....	10
Abstract	11
Introducción	12
Capítulo 1. Planteamiento del problema.....	15
1.1 Planteamiento del problema	15
1.2 Justificación.....	17
1.3 Objetivos	18
1.3.1. Objetivo General.....	18
1.3.2. Objetivos Específicos	18
Capítulo 2. Marco teórico o referentes conceptuales.....	20
2.1 Antecedentes	20
2.2 Bases teóricas	21
2.3 Normatividad.....	24
Capítulo 3. Metodología	25
3.1 FASE I. Diagnóstico del uso de agroquímicos en el proceso de cultivo de café	25
3.1.1 Actividad I. Delimitación del área de estudio	25
3.1.2 Actividad II. Recopilación de información	27
3.1.3 Actividad III. Caracterización de agroquímicos.....	29
3.1.4 Análisis de información.....	30
3.2 FASE II. Caracterizar las condiciones edafológicas, climatológicas y topográficas de la zona	31
3.2.1 Actividad I. Recopilar información edafológica	31
3.2.2 Actividad II. Recolectar información climatológica	36
3.2.3 Actividad III. Recopilar información topográfica	38
3.3 FASE III. Determinar la movilidad de agroquímicos de mayor uso a través del software PIRI	39
3.3.1 Actividad I. Revisión bibliográfica	39
3.3.2 Actividad II. Procesamiento de información en el software PIRI.....	41
Capítulo 4. Resultados y Discusión	43
4.1 FASE I. Diagnóstico del uso de agroquímicos en el proceso de cultivo de café	43

4.1.1. Actividad I. Delimitación del área de estudio	43
4.1.2. Actividad II. Recopilación de información	44
4.1.3 Actividad III. Caracterización de agroquímicos.....	48
4.1.4 Actividad 4. Análisis de información	54
4.2 FASE II. Caracterizar las condiciones edafológicas, climatológicas y topográficas de la zona	55
4.2.1. Actividad I. Recopilar información edafológica	55
4.2.2 Actividad II. Recolectar información climatológica	58
4.2.3 Actividad III. Recopilar información topográfica	61
4.3 FASE III. Determinar la movilidad de agroquímicos de mayor uso a través del software PIRI	63
4.3.1 Actividad 1. Revisión bibliográfica.....	63
4.3.2 Procesamiento de información en el software PIRI	65
4.3.3 Diseño de cartilla.....	69
Capítulo 5. Conclusiones y recomendaciones	70
5.1 Conclusiones	70
5.2 Recomendaciones.....	71
Referencias.....	73
Anexos	79

Lista de Tablas

Tabla 1. Normatividad	24
Tabla 2. Modelo caracterización de agroquímicos en cultivo de café	29
Tabla 3. Modelo para recolectar históricos de temperatura año 2024	38
Tabla 4. Resultados caracterización de agroquímicos	51
Tabla 5. Resultado de pH para cada una de las fincas muestreadas	56
Tabla 6. Resultado % Humedad para cada una de las fincas muestreadas	57
Tabla 7. Resultado de Materia orgánica para cada una de las fincas muestreadas	58
Tabla 8. Temperatura promedio para los meses de julio – diciembre 2024	59

Lista de Figuras

Figura 1. Esquema metodológico	25
Figura 2. Mapa de ubicación de veredas cafeteras Vda. Los Robles y Vda. Villa Julia	26
Figura 3. Toma de muestra de suelo mediante excavación manual en cultivo de café	32
Figura 4. Conservación de muestra compuesta en bolsa hermética rotulada para su transporte al laboratorio	32
Figura 5. Determinación del peso inicial de la muestra de suelo en balanza analítica.	33
Figura 6. Secado de muestras de suelo en horno a temperatura controlada (105–110 °C)	34
Figura 7. Valoración por retroceso con sulfato ferroso amónico empleando indicador ferroína 35	
Figura 8. Determinación potenciométrica del pH del suelo	36
Figura 9. Software Pesticide Impact Rating Index PIRI.....	42
Figura 10. Selección de agroquímicos para estimar movilidad en cultivo de café.....	42
Figura 11. Mapa de ubicación de veredas cafeteras Vda. Los Robles y Vda. Villa Julia	43
Figura 12. Uso, frecuencia de aplicación y medidas de protección en el manejo de agroquímicos en las fincas cafeteras.....	45
Figura 13. Caracterización de las condiciones del predio: análisis de agua, suelo y fuentes de abastecimiento.....	46
Figura 14. Prácticas de seguridad y manejo de agroquímicos en las fincas evaluadas	46
Figura 15. Nivel de capacitación de los caficultores en el manejo integrado de plagas y uso seguro de agroquímicos	47
Figura 16. Resultado PIRI VJ1	65
Figura 17. Resultado PIRI VJ2	66
Figura 18. Resultado PIRI VJ3	66
Figura 19. Resultado PIRI VJ4	66
Figura 20. Resultado PIRI LR1	67
Figura 21. Resultado PIRI LR2	67
Figura 22. Resultado PIRI LR3	67
Figura 23. Resultado PIRI LR4	68

Lista de anexos

Anexo 1. Encuesta	79
--------------------------------	----

Resumen

El uso de agroquímicos es una práctica común en los sistemas agrícolas contemporáneos, especialmente en cultivos de alta relevancia económica como el café. No obstante, su aplicación puede generar riesgos ambientales asociados a su movilidad en el suelo y su posible transporte hacia fuentes hídricas. En regiones montañosas, factores como la pendiente del terreno, las características edafológicas y el régimen de precipitación pueden favorecer procesos de escorrentía y lixiviación que facilitan el desplazamiento de estos compuestos hacia cuerpos de agua superficiales y subterráneos.

La presente investigación tuvo como objetivo estimar la movilidad de agroquímicos en las fuentes de agua aferentes a las zonas de cultivo de café del municipio de Sotará, Cauca. El estudio se desarrolló en fincas cafeteras ubicadas en las veredas Villa Julia y Los Robles, mediante un enfoque metodológico integrado que incluyó el diagnóstico del uso de agroquímicos, la caracterización de las condiciones edafológicas, climatológicas y topográficas del área de estudio y la aplicación del modelo Pesticide Impact Rating Index (PIRI).

Los resultados evidenciaron el uso de diversos ingredientes activos, entre ellos glifosato, benomil, paraquat, propiconazol, abamectina, mancozeb y bifentrina. La caracterización edafológica mostró suelos ácidos con valores de pH entre 4,47 y 5,40, contenidos de humedad entre 23,6 % y 41,7 %, y porcentajes de materia orgánica entre 1,27 % y 25,40 %. La modelación mediante PIRI indicó que glifosato, benomil, paraquat y propiconazol presentan un potencial de impacto ambiental clasificado como very high, mientras que abamectina mostró un nivel medium y mancozeb y bifentrina un nivel very low. Asimismo, la vereda Los Robles presentó una mayor susceptibilidad a la movilidad debido a sus pendientes pronunciadas.

En conjunto, los resultados sugieren que la movilidad potencial de agroquímicos en el área de estudio está condicionada por la interacción entre las propiedades de los compuestos utilizados y las características ambientales del territorio. Este análisis aporta información técnica relevante para orientar estrategias de manejo agrícola sostenible y fortalecer la protección del recurso hídrico en sistemas productivos cafeteros.

Palabras clave: agroquímicos, movilidad, recurso hídrico, cultivo de café, PIRI, Sotará.

Abstract

The use of agrochemicals is common practice in contemporary agricultural systems, especially in crops of high economic importance such as coffee. However, their application can generate environmental risks associated with their mobility in the soil and their possible transport to water sources. In mountainous regions, factors such as slope, soil characteristics, and precipitation patterns can promote runoff and leaching processes that facilitate the movement of these compounds into surface and groundwater bodies.

The objective of this research was to estimate the mobility of agrochemicals in water sources adjacent to coffee growing areas in the municipality of Sotará, Cauca. The study was conducted on coffee farms located in the villages of Villa Julia and Los Robles, using an integrated methodological approach that included the diagnosis of agrochemical use, the characterization of the soil, climate, and topographic conditions of the study area, and the application of the Pesticide Impact Rating Index (PIRI) model.

The results showed the use of various active ingredients, including glyphosate, benomyl, paraquat, propiconazole, abamectin, mancozeb, and bifenthrin. Soil characterization showed acidic soils with pH values between 4.47 and 5.40, moisture contents between 23.6% and 41.7%, and organic matter percentages between 1.27% and 25.40%. PIRI modeling indicated that glyphosate, benomyl, paraquat, and propiconazole have a very high potential for environmental impact, while abamectin showed a medium level and mancozeb and bifenthrin a very low level. Likewise, the Los Robles village showed greater susceptibility to mobility due to its steep slopes.

Overall, the results suggest that the potential mobility of agrochemicals in the study area is conditioned by the interaction between the properties of the compounds used and the environmental characteristics of the territory. This analysis provides relevant technical information to guide sustainable agricultural management strategies and strengthen the protection of water resources in coffee production systems.

Keywords: agrochemicals, mobility, water resources, coffee cultivation, PIRI, Sotará

Introducción

El uso de agroquímicos en la agricultura moderna ha mostrado un crecimiento sostenido a nivel mundial, motivado por la necesidad de incrementar la productividad y de asegurar el control fitosanitario de los cultivos. Estos insumos, que comprenden fertilizantes, herbicidas, insecticidas y fungicidas, han contribuido de manera significativa al aumento del rendimiento agrícola y a la estabilidad de los sistemas productivos. No obstante, el uso intensivo de agroquímicos ha suscitado preocupación debido a sus posibles implicaciones ambientales, especialmente en lo que respecta a la contaminación del suelo y de los recursos hídricos [1].

Tras su aplicación al suelo, los agroquímicos experimentan diversos procesos físicos, químicos y biológicos que determinan su destino ambiental. Entre estos procesos se encuentran la adsorción en las partículas del suelo, la degradación química y microbiana, la volatilización, la lixiviación hacia capas más profundas y la escorrentía superficial hacia cuerpos de agua cercanos. La ocurrencia e intensidad de estos mecanismos dependen tanto de las propiedades fisicoquímicas del compuesto como de las características del medio en el que se aplican, tales como la textura del suelo, el contenido de materia orgánica, la pendiente del terreno y el régimen de precipitación [2]

En Colombia, la agricultura constituye un pilar estratégico de la economía nacional y el café es uno de los cultivos más representativos tanto en términos productivos como sociales. Según la Federación Nacional de Cafeteros, la producción nacional superó los diez millones de sacos de 60 kg en 2023 [3]. Lo que posiciona al país entre los principales productores de café a nivel mundial. El sostenimiento de esta producción implica el uso de diversos agroquímicos destinados al control de plagas, enfermedades y arvenses, así como al mantenimiento de la fertilidad del suelo y del rendimiento del cultivo.

Diversos estudios han señalado que los plaguicidas pueden causar efectos adversos sobre el medio ambiente y la salud humana cuando su uso no se realiza conforme a criterios técnicos adecuados. La presencia de residuos de pesticidas en ecosistemas acuáticos ha sido documentada en diferentes regiones agrícolas del mundo, lo que evidencia que estos compuestos pueden alcanzar cuerpos de agua superficiales o subterráneos a través de procesos de lixiviación y escorrentía [4], [5]. En particular, los sistemas agrícolas ubicados en terrenos de ladera presentan una mayor susceptibilidad al transporte de contaminantes debido a la interacción entre la pendiente del terreno y la intensidad de los eventos de precipitación.

En regiones cafeteras como el departamento del Cauca, el cultivo se desarrolla en contextos geográficos y climáticos caracterizados por sistemas montañosos, pendientes pronunciadas y una alta variabilidad topográfica. Estas condiciones pueden favorecer el desplazamiento de agroquímicos desde las áreas cultivadas hacia las fuentes de agua cercanas, especialmente cuando las aplicaciones coinciden con periodos de precipitación significativa. La protección del recurso hídrico representa un componente esencial para asegurar la sostenibilidad ambiental de los sistemas productivos cafeteros.

En este contexto, evaluar el potencial de movilidad de los agroquímicos es importante como medida preventiva para identificar los compuestos que tienen más probabilidades de llegar a los ecosistemas acuáticos. Varios estudios han usado modelos de evaluación del riesgo ambiental para estimar cómo se comportan los pesticidas en el suelo y su posible traslado a fuentes de agua. Una de estas herramientas es el Pesticide Impact Rating Index PIRI, un modelo que combina información sobre las propiedades fisicoquímicas de los compuestos con factores ambientales como el suelo, el clima y la topografía, lo que ayuda a estimar el posible impacto de los pesticidas en sistemas agrícolas[6].

El municipio de Sotará, se encuentra situado en el departamento del Cauca, la producción de café se desarrolla en un entorno donde se caracteriza por la convergencia de condiciones edafológicas, climatológicas y topográficas propias de los sistemas andinos, en conjunto con la presencia de fuentes hídricas aferentes que desempeñan funciones ecológicas y sociales significativas. No obstante, se identifica una limitada sistematización de la información técnica que permita comprender el comportamiento ambiental de los agroquímicos empleados en los cultivos de café bajo las condiciones específicas del territorio.

En respuesta a esta necesidad, la presente investigación tiene como objetivo estimar la movilidad de agroquímicos en las fuentes de agua aferentes a las zonas de cultivo de café del municipio de Sotará, Cauca. Para ello, se adopta un enfoque metodológico integrado que contempla el diagnóstico del uso de agroquímicos en fincas seleccionadas, la caracterización de las condiciones edafológicas, climatológicas y topográficas del área de estudio y la aplicación del modelo Pesticide Impact Rating Index (PIRI) para determinar el potencial de movilidad de los compuestos de mayor uso.

De esta manera, el estudio busca contribuir al fortalecimiento de la gestión ambiental del recurso hídrico en contextos cafeteros, aportando información técnica que permita orientar prácticas agrícolas más sostenibles y responsables, en concordancia con la protección ambiental y el bienestar de las comunidades rurales del municipio de Sotará

Capítulo 1. Planteamiento del problema

1.1 Planteamiento del problema

El incremento sostenido en el uso de agroquímicos a nivel mundial responde a la necesidad de mantener y aumentar la productividad agrícola, ante las demandas del mercado y de la seguridad alimentaria. En 2023, el mercado global de fertilizantes y agroinsumos alcanzó cifras significativas, lo que evidencia la dependencia estructural de los sistemas productivos modernos respecto de estos insumos [7]. No obstante, junto con los beneficios agronómicos derivados de su aplicación, se han identificado impactos ambientales asociados a su uso inadecuado o excesivo, en particular en relación con la contaminación de suelos y cuerpos de agua [2].

En Colombia, la agricultura constituye un sector estratégico para la economía nacional, y el café es uno de los cultivos más representativos del país. Según la Federación Nacional de Cafeteros, la producción anual supera los diez millones de sacos de 60 kg, lo que posiciona al país entre los principales productores a nivel internacional[3]. El sostenimiento de esta producción implica el uso de diversos agroquímicos, entre ellos herbicidas, insecticidas, fungicidas y fertilizantes, destinados al manejo de plagas, enfermedades y arvenses [6].

Sin embargo, diversos estudios han advertido que los plaguicidas pueden causar efectos adversos en el medio ambiente y en la salud humana cuando su uso no está debidamente controlado, lo que afecta los ecosistemas acuáticos debido a su toxicidad y persistencia [2]. Asimismo, investigaciones sobre la degradación y la movilidad de agroquímicos en suelos y aguas naturales indican que ciertos compuestos presentan capacidad de transporte hacia cuerpos de agua superficiales y subterráneos, dependiendo de sus propiedades fisicoquímicas y de las condiciones ambientales del entorno[8].

En regiones cafeteras de topografía montañosa, como el departamento del Cauca, el riesgo potencial de movilización de agroquímicos puede verse incrementado por factores como la pendiente del terreno, la intensidad de las precipitaciones y la proximidad entre áreas cultivadas y fuentes hídricas. El Comité de Cafeteros del Cauca [3] ha resaltado la importancia de fortalecer el componente ambiental de la producción cafetera, en particular en lo relativo a la protección del recurso hídrico. No obstante, en muchos contextos rurales persisten prácticas agrícolas que pueden favorecer el escurrimiento superficial y el arrastre de contaminantes hacia quebradas y ríos.

La evidencia empírica en otras regiones ha demostrado la presencia de residuos de agroquímicos en microcuencas abastecedoras, identificándose compuestos con distintos niveles de toxicidad y movilidad, lo que representa un riesgo potencial para la salud humana y los ecosistemas acuáticos [9]. Asimismo, el uso de herramientas de evaluación, como el PIRI ha permitido estimar la peligrosidad asociada al empleo de plaguicidas bajo condiciones específicas de suelo y clima, evidenciando que un porcentaje considerable de sustancias puede clasificarse como altamente móviles o tóxicas [10].

En el municipio de Sotará, Cauca, la producción cafetera se lleva a cabo en un entorno caracterizado por la convergencia de condiciones edafológicas, climatológicas y topográficas propias de los sistemas andinos, así como por la presencia de fuentes de agua aferentes que desempeñan funciones ecológicas y sociales relevantes. Sin embargo, no existe información sistematizada que permita determinar con claridad el potencial de movilidad de los agroquímicos empleados en los cultivos de café bajo las condiciones particulares del territorio. Esta ausencia de análisis específico limita la capacidad para formular estrategias de manejo preventivo basadas en evidencia técnica.

La problemática central consiste en la necesidad de comprender las interacciones existentes entre las prácticas de uso de agroquímicos en cultivos de café y las características ambientales locales, así como en qué medida dichas interacciones pueden favorecer la movilidad de dichos compuestos hacia fuentes de agua cercanas. Sin una estimación técnica que integre el diagnóstico de uso, la caracterización del medio físico y herramientas de evaluación reconocidas resulta complejo dimensionar el riesgo potencial y orientar acciones para la gestión sostenible del recurso hídrico.

Esta investigación aborda la problemática mediante la estimación de la movilidad de los agroquímicos de mayor uso, integrando la información recolectada en campo y el procesamiento de variables ambientales mediante el software PIRI. Así, se busca aportar un análisis técnico que contribuya a la protección del recurso hídrico y al fortalecimiento de las prácticas agrícolas sostenibles en el municipio de Sotará.

En este contexto, surge la siguiente pregunta de investigación: ¿Cuál es el potencial de movilidad de los agroquímicos utilizados en cultivos de café hacia las fuentes de agua aferentes en el municipio de Sotará, Cauca?

1.2 Justificación

La intensificación de las actividades agrícolas en diversas regiones del mundo ha provocado un incremento en el uso de agroquímicos destinados a optimizar la productividad de los cultivos y a controlar plagas, enfermedades y malezas. Aunque estos insumos han contribuido de manera significativa al aumento de la producción agrícola, su aplicación también ha generado preocupaciones respecto a sus posibles efectos sobre el medio ambiente, especialmente en relación con la contaminación del suelo y los recursos hídricos [2]. En este contexto, comprender el comportamiento ambiental de los agroquímicos y su potencial de movilidad en los ecosistemas agrícolas constituye un aspecto fundamental para la gestión sostenible de los sistemas productivos.

En particular, los pesticidas pueden contaminar cuerpos de agua superficiales y subterráneos. Esto ocurre a través de procesos como la escorrentía superficial, la lixiviación y el transporte asociado a partículas del suelo. La eficacia de estos procesos depende tanto de las propiedades fisicoquímicas de los compuestos utilizados como de las características ambientales del territorio en el que se aplican, incluyendo la pendiente del terreno, la textura del suelo y el contenido de materia orgánica, así como el régimen de precipitaciones [4]. Por consiguiente, la evaluación del riesgo potencial vinculado al empleo de agroquímicos necesita métodos integrados. Estas perspectivas deben tener en cuenta a la vez las circunstancias del entorno físico y las propiedades de los productos utilizados, características y condiciones del medio físico de los productos utilizados.

Desde una perspectiva científica y metodológica, la estimación del potencial de movilidad de los agroquímicos mediante herramientas de evaluación del riesgo ambiental constituye una estrategia eficaz para identificar los compuestos con mayor probabilidad de generar impactos en los recursos hídricos. En este contexto, modelos como el PIRI permiten integrar información sobre las propiedades fisicoquímicas de los pesticidas, su toxicidad y las condiciones ambientales del sitio de aplicación, con el objetivo de estimar su potencial impacto en la calidad del agua[6].

El uso de estas herramientas contribuye a la generación de información técnica relevante. Esta información puede respaldar la toma de decisiones en el manejo agrícola y la protección ambiental.

En el contexto colombiano, el cultivo de café constituye una de las actividades agrícolas más relevantes. Esta actividad posee una importancia económica y social considerable, y se

desarrolla principalmente en regiones montañosas. Estas regiones se caracterizan por condiciones topográficas complejas y una alta diversidad de ambientes edafológicos y climáticos. En estos territorios, la presencia de pendientes pronunciadas y la proximidad entre las áreas de cultivo y las fuentes hídricas pueden favorecer el transporte de agroquímicos hacia los ecosistemas acuáticos, lo que exige una evaluación preventiva de los posibles riesgos asociados al uso de estos insumos en los sistemas productivos cafeteros.

El municipio de Sotará, situado en el departamento del Cauca, representa un territorio en el que la producción cafetera desempeña un papel fundamental en la economía local y en los medios de vida de las comunidades rurales [11]. No obstante, la información disponible sobre el comportamiento ambiental de los agroquímicos empleados en los cultivos de café bajo las condiciones específicas del municipio es aún limitada. Esta situación evidencia la necesidad de realizar estudios que permitan comprender de manera más precisa el potencial de movilidad de estos compuestos en el territorio, considerando las características edafológicas, topográficas y climáticas que inciden en su transporte ambiental.

En este sentido, la presente investigación se justifica por su objetivo de aportar información técnica sobre el potencial de movilidad de los agroquímicos empleados en zonas de cultivo de café en el municipio de Sotará, Cauca, mediante la integración de herramientas de diagnóstico agrícola, caracterización ambiental y modelación de riesgo. Los resultados de este estudio pueden contribuir al fortalecimiento de prácticas agrícolas sostenibles, así como a la protección del recurso hídrico en territorios donde la caficultura representa una actividad fundamental para el desarrollo local.

1.3 Objetivos

1.3.1. *Objetivo General*

Estimar la movilidad de agroquímicos en las fuentes de agua aferentes a zonas de cultivo de café en el municipio de Sotará, Cauca.

1.3.2. *Objetivos Específicos*

- Diagnosticar el uso de agroquímicos en el proceso de cultivo de café

- Caracterizar las condiciones edafológicas, climatológicas y topográficas de la zona de estudio
- Determinar la movilidad de agroquímicos de mayor uso a través del software PIRI

Capítulo 2. Marco teórico o referentes conceptuales

2.1 Antecedentes

Se ha tratado el estudio de la movilidad de agroquímicos en los sistemas agrícolas desde vistas distintas. Estas abarcan la investigación de la existencia de desechos en cuerpos acuáticos, la aplicación de modelos de evaluación preventiva y cálculo del riesgo ecológico. A continuación, se presentan antecedentes relevantes a nivel internacional, nacional y regional que fundamentan la pertinencia de esta investigación. A continuación, se presentan antecedentes relevantes a nivel internacional, nacional y regional que sustentan la pertinencia de la presente investigación.

Diversos estudios han documentado la presencia de residuos de plaguicidas en microcuencas agrícolas, lo que evidencia que la movilidad de estos compuestos depende tanto de sus propiedades fisicoquímicas como de las condiciones ambientales. Investigaciones en América Latina han señalado que herbicidas, organofosforados y carbamatos pueden alcanzar las fuentes de agua superficiales debido a procesos de escorrentía y lixiviación, especialmente en zonas con pendientes y alta precipitación [5]

En Honduras, se realizó un estudio en tres microcuencas abastecedoras, en el que se identificaron múltiples compuestos agroquímicos en las fuentes de agua, incluidos triazinas, organofosforados y carbamatos [12]. El estudio llega a la conclusión de que la mezcla de una solubilidad elevada, El hecho de que las prácticas agrícolas estén cercanas a cuerpos hídricos y la persistencia moderada a alta de estos compuestos propician su transporte, lo cual supone un peligro potencial para la salud de los humanos y para los ecosistemas acuáticos. Este análisis enfatiza la relevancia de combinar el diagnóstico de uso con el análisis espacial para entender la dinámica de arrastre de agroquímicos.

A nivel metodológico, la aplicación de herramientas de evaluación, como el Pesticide Impact Rating Index (PIRI), ha permitido estimar la peligrosidad asociada al uso de plaguicidas en condiciones ambientales específicas [13]. Gustafson [14] aplicó el PIRI en un cultivo de cebolla, evidenciando que un porcentaje significativo de los plaguicidas utilizados presentaba alta movilidad o elevada toxicidad. Los resultados demostraron la utilidad del modelo como

herramienta preventiva para priorizar las sustancias con mayor impacto potencial sobre los cuerpos de agua.

La evidencia internacional demuestra que la movilidad de agroquímicos constituye una problemática recurrente en los sistemas agrícolas y que la aplicación de modelos de índice permite estimar el riesgo potencial en ausencia de monitoreo sistemático.

En Colombia, las investigaciones sobre agroquímicos se han enfocado principalmente en la evaluación de su toxicidad y en el desarrollo de estrategias para reducir su uso [15]. Estos estudios han documentado los efectos de los plaguicidas en el ambiente y en la salud, y subrayan la importancia de considerar tanto la persistencia como la capacidad de transporte de estos compuestos en la evaluación del riesgo.

Se llevó a cabo una estrategia biotecnológica en la industria cafetera, con el objetivo de disminuir el empleo de productos químicos agrícolas en la fabricación de café. A pesar de que la perspectiva fue cualitativa y enfocada en prácticas sostenibles, la investigación evidenció que el mal uso de agroquímicos puede provocar cambios significativos en el medio ambiente, lo que refuerza la necesidad de llevar a cabo análisis técnicos que posibiliten evaluar su posible impacto.

2.2 Bases teóricas

Para analizar la movilidad de agroquímicos en sistemas agrícolas, es necesario entender su comportamiento medioambiental después de ser aplicados, así como su naturaleza química y su función agronómica. Los agroquímicos son una serie de compuestos utilizados para el control de plagas, enfermedades y malezas, además de mejorar la productividad de los cultivos. [16]. Una vez aplicados al suelo, los agroquímicos no permanecen estáticos en el sitio de aplicación, sino que entran en una dinámica compleja de procesos físicos, químicos y biológicos que determinan su destino ambiental. Entre estos procesos se encuentran la adsorción a partículas minerales y materia orgánica, la degradación por acción microbiana o química, la volatilización, la lixiviación hacia capas más profundas y la escorrentía superficial hacia cuerpos de agua cercanos. La ocurrencia e intensidad de cada uno de estos mecanismos dependen tanto de las propiedades intrínsecas del compuesto como de las condiciones edafológicas y climáticas del entorno [17].

La movilidad, entendida como la capacidad de un agroquímico para desplazarse desde el lugar de aplicación hacia otros compartimentos ambientales, constituye un concepto central en la

evaluación del riesgo hídrico. Esta movilidad está vinculada a características como la solubilidad en el agua, la duración o vida media y el coeficiente de adsorción al carbono orgánico (Koc). Los compuestos que tienen una baja capacidad de adsorción y una alta solubilidad tienden a mostrar un mayor potencial de lixiviación. Por el contrario, los compuestos que tienen una gran afinidad por la materia orgánica tienden a quedarse estancados en el suelo. No obstante, estos compuestos pueden ser vulnerables al desplazamiento por medio de la sedimentación durante episodios de escorrentía fuerte. Por consiguiente, la movilidad de un compuesto no es una propiedad absoluta, sino que está sujeta a las condiciones del entorno en el que se aplica rasgo absoluto del compuesto, sino una estado en relación con el ambiente en el que se lleva a cabo.

En esta dinámica, el suelo desempeña un papel esencial. La textura, la humedad, el pH y la cantidad de materia orgánica afectan directamente tanto la capacidad de transporte o retención del agroquímico como su disponibilidad en solución. El pH tiene la capacidad de cambiar. La materia orgánica, que es el principal agente de adsorción, tiene el potencial de disminuir la movilidad vertical. La humedad influye en la disolución y en la actividad la estabilidad y el grado de ionización de ciertas moléculas modifican su comportamiento químico microbiana que se encarga de los procesos de degradación; la textura determina cuán permeable y poroso es el suelo, lo cual afecta la lixiviación y la infiltración. Por esta razón, la caracterización edafológica es un elemento fundamental en toda investigación sobre movilidad.

A estos factores se suman las condiciones topográficas y climatológicas. En sistemas agrícolas de ladera, comunes en las regiones andinas cafeteras, la pendiente del terreno aumenta la velocidad del flujo superficial, lo que favorece la escorrentía y el transporte de residuos químicos hacia quebradas y ríos. La precipitación, especialmente en forma de lluvias intensas, actúa como desencadenante del transporte horizontal y vertical de contaminantes. La combinación de pendientes pronunciadas y eventos de alta pluviosidad puede, por tanto, aumentar significativamente el potencial de contaminación difusa de las fuentes hídricas[18].

La contaminación difusa derivada de actividades agrícolas representa un desafío para la gestión ambiental, ya que no proviene de un único punto identificable, sino de múltiples áreas de aplicación distribuidas por el territorio. Estudios en microcuencas agrícolas han evidenciado la presencia de residuos de plaguicidas en aguas superficiales. Esto confirma que el uso reiterado de estos compuestos, junto con condiciones ambientales que favorecen su transporte, puede conducir

a su movilización hacia cuerpos de agua de estos compuestos, combinado con condiciones ambientales favorables al transporte, puede conducir a su movilización hacia cuerpos de agua [19]. Este fenómeno es especialmente relevante en territorios donde las fuentes hídricas cumplen funciones ecológicas y sociales fundamentales.

Analizar el riesgo ambiental de los agroquímicos se fundamenta en la interrelación entre la posibilidad de exposición del medio receptor y el peligro inherente al compuesto. El riesgo se define, de manera teórica, como la multiplicación entre el peligro (hazard) y la exposición. Se puede clasificar la peligrosidad de un compuesto a través de la toxicidad, que se determina utilizando indicadores como la CL50 o la DL50. No obstante, esta clasificación es incompleta si no se toma en cuenta la probabilidad de que el compuesto llegue a un ecosistema en el agua. Por lo tanto, los métodos de evaluación contemporáneos combinan variables ambientales que determinan la movilidad con parámetros toxicológicos.

En este contexto, el modelo PIRI se basa en la integración de información sobre toxicidad, propiedades del compuesto, condiciones del suelo y características topográficas y climáticas para estimar el impacto potencial relativo en cuerpos de agua. El modelo no predice concentraciones exactas en el medio hídrico, sino que proporciona una clasificación comparativa del potencial de impacto bajo condiciones específicas. Estudios previos han demostrado su Utilidad como herramienta preventiva en sistemas agrícolas, ya que permite identificar sustancias de mayor riesgo relativo y orientar las decisiones de manejo[10].

Desde este punto de vista, la implementación del PIRI en entornos cafeteros andinos tiene relevancia teórica porque incorpora factores productivos y ambientales en un estudio sistemático del potencial de movilidad. Para una evaluación contextualizada del comportamiento ambiental de los agroquímicos, se pueden utilizar parámetros como la pendiente, el pH, la humedad, la materia orgánica y el régimen de precipitación. Esto concuerda con el enfoque de gestión integral del recurso hídrico.

Las bases teóricas de la presente investigación se apoya en la comprensión de los procesos de degradación y transporte de agroquímicos en el suelo, la influencia de factores edafológicos, topográficos y climáticos en su movilidad, y los principios de la evaluación del riesgo ambiental que integran la toxicidad y la exposición. Esta fundamentación conceptual respalda metodológicamente la estimación de la movilidad de agroquímicos en fuentes de agua aferentes a

zonas de cultivo de café en el municipio de Sotará, lo que permite articular la producción agrícola y la protección ambiental bajo un enfoque técnico y preventivo.

2.3 Normatividad

Tabla 1.

Normatividad

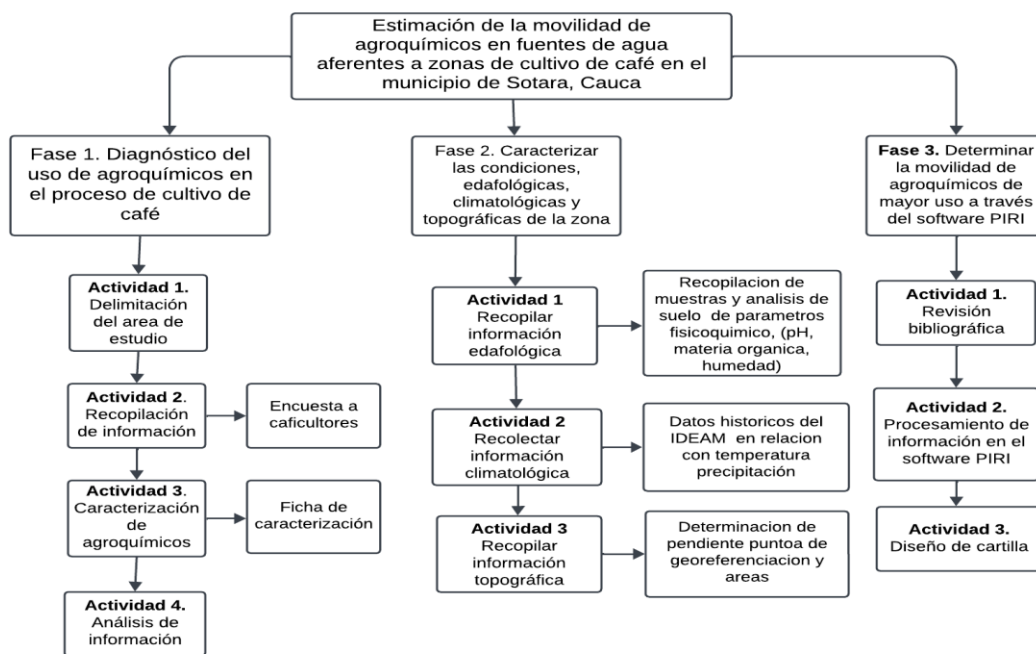
Norma	Descripción	Referencia
Constitución política de Colombia Art. 79 y 80	Establece el derecho a gozar de un ambiente sano y la obligación del Estado de planificar el manejo y aprovechamiento de los recursos naturales para garantizar su desarrollo sostenible	[20]
Decreto 1843 de 1991	Reglamenta el uso y manejo de plaguicidas de uso agrícola, estableciendo responsabilidades en almacenamiento, aplicación y disposición	[21]
Decreto 4741 de 2005	Regula la gestión integral de residuos peligrosos, incluidos los envases y empaques de agroquímicos.	[22]

Nota. Elaboración propia con base en la normatividad citada.

Capítulo 3. Metodología

Figura 1.

Esquema metodológico



3.1 FASE I. Diagnóstico del uso de agroquímicos en el proceso de cultivo de café

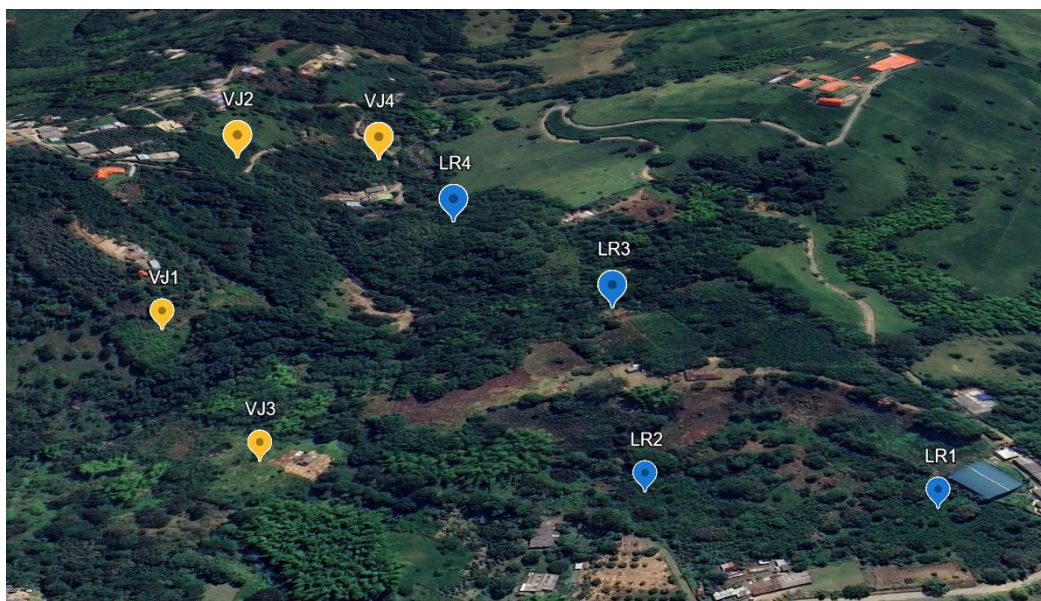
3.1.1 Actividad I. Delimitación del área de estudio

El estudio se desarrolló en el municipio de Sotará, departamento del Cauca, Colombia, específicamente en el corregimiento de Sachacoco, un territorio con vocación agrícola donde el cultivo de café constituye una de las principales actividades productivas. Dentro de este corregimiento se ubican las veredas Villa Julia y Los Robles, donde se concentran aproximadamente 20 fincas cafeteras en sistemas de ladera.

Para el desarrollo de la investigación, se seleccionó una muestra de ocho (8) fincas cafeteras (Figura 2), distribuidas en las veredas mencionadas, considerando como criterio principal su proximidad al río Los Robles, fuente hídrica relevante en el área de estudio. Esta selección permitió enfocar el análisis en unidades productivas con mayor susceptibilidad a procesos de transporte de agroquímicos hacia cuerpos de agua.

Figura 2.

Mapa de ubicación de veredas cafeteras Vda. Los Robles y Vda. Villa Julia



Adicionalmente, se tuvieron en cuenta criterios técnicos previamente definidos en la propuesta de investigación, entre los cuales se incluyen: (i) la presencia activa de cultivo de café, (ii) la cercanía a fuentes de agua, (iii) la existencia de pendientes representativas del sistema productivo local y (iv) la accesibilidad a los predios para el desarrollo del trabajo de campo.

La delimitación espacial se realizó mediante visitas técnicas preliminares, en las que se identificaron los lotes cultivados y su relación con las fuentes hídricas cercanas. Durante estas visitas se efectuó la toma de coordenadas geográficas mediante el sistema de posicionamiento global (GPS), lo que permitió georreferenciar los predios seleccionados y establecer su ubicación relativa respecto de quebradas, drenajes naturales y otros elementos del paisaje. Esta información se utilizó posteriormente para elaborar la cartografía temática del área de estudio.

También se detectaron los rasgos topográficos generales de las propiedades, en particular la inclinación y dirección del terreno, por su impacto en los procesos de escorrentía superficial y en el transporte potencial de agroquímicos hacia cuerpos acuáticos. En este contexto, la delimitación tomó en cuenta no únicamente dónde se encuentran los cultivos, sino además su conexión con el río Los Robles en términos hidrológicos, un factor esencial para estudiar la movilidad de productos agroquímicos.

Así, la delimitación del área de estudio hizo posible la definición de las unidades productivas objeto de análisis y determinar la escala de evaluación del estudio. Esta La definición espacial se considera un insumo esencial para la posterior incorporación de variables topográficas, climatológicas y edafológicas en el modelo PIRI. Esto asegura que la estimación de la movilidad de agroquímicos se fundamente en las condiciones ambientales representativas del área evaluada.

.Finalmente, esta etapa no se limitó a una descripción geográfica del área, sino que permitió articular las prácticas agrícolas locales con las condiciones ambientales del territorio, estableciendo una base sólida para el análisis del potencial de transporte de agroquímicos hacia fuentes de agua aferentes en el municipio de Sotará.

3.1.2 Actividad II. Recopilación de información

Con el fin de diagnosticar el uso de agroquímicos en el cultivo de café, se diseñó y aplicó un instrumento de recolección de información primaria dirigida a los caficultores de los predios seleccionados en las veredas de Villa Julia y Los Robles. El modelo de encuesta aplicado se presenta en el **Anexo 1**.

El instrumento incorporó preguntas cerradas y de selección múltiple, que fueron elaboradas para conseguir datos cuantitativos sobre el uso de agroquímicos, además de preguntas abiertas enfocadas a profundizar en métodos concretos de medición, almacenamiento y protección. La encuesta se...organizó en cuatro bloques temáticos fundamentales: (i) descripción general del predio, (ii) gestión técnica de la siembra, (iii) empleo y regularidad en la aplicación de agroquímicos y (iv) métodos de gestión y seguridad.

. En la primera sección se compilaron datos fundamentales sobre la propiedad, como el nombre del el área en total, los propietarios o arrendatarios, las hectáreas dedicadas a la plantación de café y la diversidad del café sembrado. Estos datos facilitaron la comprensión de la magnitud de la producción y el sistema agrícola municipal.

El segundo bloque examinó aspectos vinculados con la gestión técnica del cultivo, incluyendo el análisis de parámetros fisicoquímicos de la calidad del suelo y del agua, la implementación de capacitaciones en manejo integrado de plagas y la existencia de registros de producción. Estas variables facilitaron la evaluación del nivel de tecnificación y del

acompañamiento técnico brindado a los productores, factores que pueden incidir de manera indirecta en el uso racional de agroquímicos.

El empleo de agroquímicos fue el enfoque del tercer bloque. Se recogieron datos acerca de las clases de productos utilizados (fungicidas, herbicidas, pesticidas y fertilizantes), el origen del agua usada y la periodicidad de aplicación (cada mes, cada dos meses, cada seis meses o una vez al año) para el riego. Para determinar los compuestos de mayor uso, esta información fue fundamental y establecer la carga potencial que se puede aplicar a la región, factores indispensables para el cálculo después de la movilidad a través del modelo PIRI.

Las prácticas de seguridad y manejo fueron el foco del cuarto bloque. Esto abarcó la utilización de Equipos de protección individual. Además, se examinó la presencia de herramientas apropiadas para calcular agroquímicos. Los insumos para contener derrames fueron otros elementos relevantes, y las circunstancias de almacenaje. Estas variables facilitaron la adición de información al diagnóstico técnico con un enfoque hacia las circunstancias operativas en las que se manejan los productos, lo cual puede afectar la dispersión accidental o la gestión inapropiada.

El instrumento se aplicó de forma presencial durante las visitas de campo, a través de entrevistas directas con los caficultores, y se aseguró la confidencialidad de la información proporcionada. Para ello, se codificaron las fincas mediante un código por vereda y se explicó el propósito académico de la investigación. El muestreo fue de tipo intencional, seleccionando predios con cultivo activo de café y con proximidad a fuentes de agua aferentes, lo que aseguró la pertinencia de los datos respecto al objetivo del estudio.

Esta fase proporcionó una base técnica para seleccionar los compuestos analizados en la estimación de movilidad, evitando supuestos teóricos y asegurando coherencia con la realidad productiva del área de estudio.

Por lo tanto, la encuesta realizada fue una herramienta metodológica esencial, dado que posibilitó conseguir información directa acerca del efecto que tienen las actividades productivas en elementos ambientales concretos y suministró datos primarios que son fiables y que apoyan el desarrollo de las etapas subsiguientes de la investigación.

3.1.3 Actividad III. Caracterización de agroquímicos

Después de haber reunido información acerca del uso de agroquímicos mediante encuestas Los productos utilizados en el manejo del cultivo de café, aplicados a los caficultores, fueron caracterizados en las fincas elegidas. La finalidad de esta actividad fue estructurar y sistematizar la Datos adquiridos durante el trabajo de campo. Así, los ingredientes fueron identificados. componentes activos que se encuentran en los agroquímicos empleados por los agricultores.

Se diseñó una ficha de caracterización de agroquímicos para registrar y consolidar los datos obtenidos durante las visitas a las fincas (Tabla 2). Esta herramienta permitió estructurar la información correspondiente a cada producto identificado. Las variables incluidas fueron: nombre comercial, ingrediente activo, categoría toxicológica, presentación, forma de aplicación, dosis recomendada, frecuencia de uso y etapas del ciclo del cultivo en que se aplica. Además, se consideraron el uso de equipos de protección personal durante la aplicación y las condiciones de almacenamiento en las unidades productivas.

Tabla 2.

Modelo caracterización de agroquímicos en cultivo de café

CARACTERIZACIÓN DE AGROQUÍMICOS									
Nombre del agroquímico	Ingrediente activo	Categoría Toxicología	Presentación	Forma de aplicación	Dosis recomendada	Frecuencia de aplicación (veces/año)	Momentos de aplicación	Equipo de protección utilizado	Almacenamiento y manejo

A partir de la caracterización realizada, se identificaron los ingredientes activos asociados a los productos utilizados en las fincas estudiadas, los cuales corresponden a diferentes categorías de plaguicidas empleados para el control de malezas, plagas y enfermedades del cultivo de café. La identificación de estos compuestos permitió establecer la base de información necesaria para el desarrollo de las etapas posteriores de la investigación, en particular para la selección de los agroquímicos que se evaluarían mediante el análisis de movilidad con el software PIRI.

3.1.4 Análisis de información

Una vez recopilada la información mediante la aplicación de encuestas a los caficultores y el diligenciamiento de la ficha de caracterización de agroquímicos, se procedió a su organización y análisis con el propósito de identificar los productos utilizados en el manejo del cultivo de café en las fincas evaluadas. La información recolectada durante el trabajo de campo fue sistematizada en matrices de datos, lo que permitió consolidar variables relacionadas con el tipo de producto, el ingrediente activo, la frecuencia de uso y las condiciones de aplicación.

A partir de este proceso, se identificaron los agroquímicos empleados por los productores y se determinaron sus respectivos ingredientes activos, que corresponden a diferentes categorías de plaguicidas utilizados para el control de malezas, plagas y enfermedades del cultivo. La organización de esta información permitió establecer un conjunto de compuestos representativos del manejo agronómico en el área de estudio.

Posteriormente, los ingredientes activos identificados fueron seleccionados según su presencia en las fincas evaluadas y la disponibilidad de información técnica sobre sus propiedades fisicoquímicas, necesaria para el análisis ambiental. Este procedimiento permitió definir los compuestos que se evaluarían según su potencial de movilidad.

La selección de los compuestos se realizó considerando la información obtenida durante el diagnóstico del uso de agroquímicos en las fincas, así como la disponibilidad de información técnica sobre las propiedades fisicoquímicas de los ingredientes activos necesarios para el análisis de movilidad. Estos compuestos fueron posteriormente utilizados como insumo para la aplicación del modelo PIRI, herramienta que permite estimar el potencial impacto de los pesticidas sobre los recursos hídricos a partir de la integración de variables relacionadas con las características del compuesto y las condiciones ambientales del área de estudio [6]

De esta manera, el análisis de la información permitió establecer la base de datos necesaria para el desarrollo de la fase de evaluación del potencial de movilidad de los agroquímicos, lo que constituyó un paso clave para la aplicación del modelo de análisis ambiental empleado en la presente investigación.

3.2 FASE II. Caracterizar las condiciones edafológicas, climatológicas y topográficas de la zona

3.2.1 Actividad I. Recopilar información edafológica

Con el fin de caracterizar las condiciones edafológicas del área de estudio, se recopiló información sobre algunas propiedades físicas y químicas del suelo de las fincas seleccionadas. La caracterización de estas variables resulta fundamental en estudios ambientales relacionados con el comportamiento de los agroquímicos, ya que las propiedades del suelo influyen directamente en procesos como la adsorción, la retención, la degradación y la movilidad de los compuestos químicos aplicados en sistemas agrícolas [23].

Para obtener la información, se realizó un muestreo de suelo en fincas cafeteras ubicadas en las veredas Villa Julia y Los Robles, previamente delimitadas como área de estudio. En cada finca se definieron puntos de muestreo representativos de las zonas cultivadas de café para recolectar muestras y evaluar las propiedades edafológicas. El muestreo se basó en la guía de muestreo de suelos [24], metodología que ha sido utilizada en otros estudios [25], [26], [27]. Este consistió en obtener muestras compuestas mediante un recorrido en zigzag a lo largo del lote cultivado, para reducir el sesgo espacial asociado a la variabilidad intrínseca del suelo y garantizar mayor representatividad. Cada muestra compuesta fue conformada por submuestras, con el retiro previo de la cobertura superficial del suelo, a 5 cm y a 15 cm de profundidad (Figura3), capas de especial interés porque en ellas se concentran procesos recientes de aplicación de agroquímicos y fenómenos de escorrentía superficial, mayor actividad biológica y la interacción entre el sistema radicular de las plantas y los insumos agrícolas aplicados.

Figura 3.

Toma de muestra de suelo mediante excavación manual en cultivo de café



Esta estrategia permitió considerar los procesos iniciales de retención, transformación y transporte de sustancias en el perfil superficial, lo que proporcionó una base adecuada para el análisis de las propiedades edafológicas del área de estudio. [24]

Las muestras recolectadas fueron debidamente identificadas, almacenadas y transportadas para su análisis en el laboratorio (Figura 4), donde se realizaron los procedimientos necesarios para determinar los parámetros considerados en el estudio. Para la práctica de laboratorio se tuvo en cuenta la metodología del manual de técnicas analíticas para análisis de suelo [28].

Figura 4.

Conservación de muestra compuesta en bolsa hermética rotulada para su transporte al laboratorio



A partir de estas muestras se determinaron los parámetros tales como pH del suelo, contenido de humedad y porcentaje de materia orgánica, que permiten describir algunas de las características más relevantes del suelo en relación con el comportamiento ambiental de los agroquímicos. El pH del suelo se determinó mediante el método potenciométrico con un pH-metro calibrado, mientras que el contenido de humedad se determinó por el método gravimétrico, mediante secado en horno a temperatura controlada hasta alcanzar peso constante. Por su parte, el contenido de materia orgánica se determinó mediante métodos analíticos comúnmente empleados en estudios edafológicos para estimar la fracción orgánica del suelo.

La determinación del contenido de humedad se realiza mediante el método gravimétrico. En una cápsula de porcelana previamente limpia y seca, se realiza el tarado en balanza analítica. Posteriormente, se pesan aproximadamente 50 g de suelo fresco (W_{suelo}) y se registra el peso del conjunto cápsula + muestra como W_1 (Figura 5).

Figura 5.

Determinación del peso inicial de la muestra de suelo en balanza analítica.



La cápsula con la muestra se lleva al horno a una temperatura entre 105 y 110 °C durante 24 horas o hasta que alcance un peso constante. Este proceso permite eliminar el contenido de agua presente en la muestra (Figura 6).

Figura 6.

Secado de muestras de suelo en horno a temperatura controlada (105–110 °C)



Transcurrido el tiempo de secado, la cápsula debe ser retirada, dejándola enfriar y pesándola nuevamente en balanza analítica, registrándose este valor como W2 (peso final del suelo seco más el peso de la cápsula). El porcentaje de humedad del suelo se determina mediante la expresión:

$$\%Humedad = \frac{W_{agua} * 100}{W_{Suelo}}$$

Donde:

- $W_{agua} = W1 - W2$
- W1= peso inicial del suelo más cápsula
- W2 = peso final del suelo seco más cápsula

Cada muestra debe analizarse por triplicado y, posteriormente, se calculan el promedio y la desviación estándar.

El análisis de materia orgánica se basa en la oxidación con dicromato de potasio y en la valoración por retroceso con sulfato ferroso amónico (FAS). Inicialmente, se deben pesar 0,1 g de suelo seco al aire en un beaker de 500 mL posteriormente, dentro de la campana extractora de gases, se agregan 10 mL de solución de dicromato de potasio ($K_2Cr_2O_7$) 1,0 N y 20 mL de ácido sulfúrico concentrado (H_2SO_4). La mezcla se agita magnéticamente durante 2 minutos para homogeneizar la suspensión y facilitar la oxidación, la suspensión se deja reposar durante 30 minutos para permitir el desarrollo completo de la reacción. Posteriormente, se adicionan 200 mL de agua destilada y 10 mL de ácido fosfórico concentrado (H_3PO_4), lo que permite que la mezcla

se enfríe. Para la valoración, se llena una bureta de 25 mL con sulfato ferroso amónico ($\text{Fe}(\text{NH}_4)_2(\text{SO}_4)_2$) 0,5 M. Se agregan 10 gotas del indicador ferroína ($\text{C}_{36}\text{H}_{24}\text{FeN}_6^{2+}$) y se realiza agitación magnética constante hasta observar el viraje del indicador (de verde a marrón), señalando el punto final de la titulación [28], (Figura 7).

Figura 7.

Valoración por retroceso con sulfato ferroso amónico empleando indicador ferroína



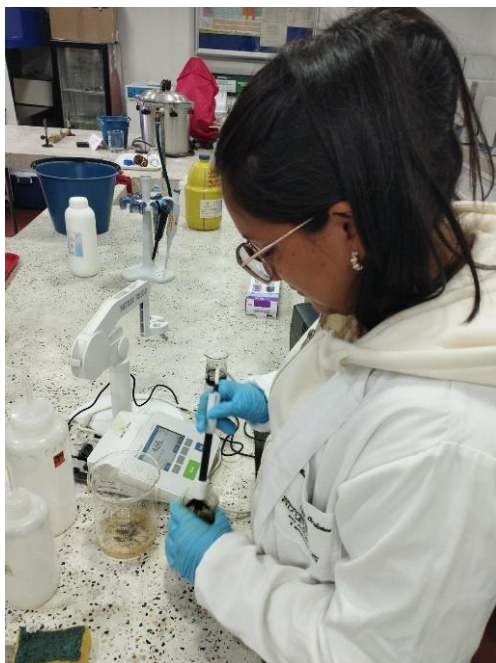
La determinación de estas variables permite obtener información sobre las condiciones edafológicas del área de estudio, que constituyen un factor clave en los procesos de retención y transporte de agroquímicos en el suelo. En particular, el pH influye en la solubilidad y la estabilidad de los compuestos químicos, mientras que la humedad y el contenido de materia orgánica afectan los procesos de adsorción y de movilidad de los pesticidas en los sistemas agrícolas.

La determinación del pH se realiza mediante medición potenciométrica con un pH-metro previamente calibrado, conforme a los equipos descritos en el manual, se prepara la suspensión

suelo-solución y se realiza la lectura directa con el electrodo, asegurando la estabilidad durante la medición antes de registrar el valor (Figura 8).

Figura 8.

Determinación potenciométrica del pH del suelo



La información edafológica obtenida en esta etapa fue utilizada posteriormente como insumo para la interpretación del comportamiento potencial de los agroquímicos en el área de estudio y para el análisis del riesgo de movilidad hacia fuentes de agua aferentes a las zonas de cultivo de café

3.2.2 Actividad II. Recolectar información climatológica

La caracterización de las condiciones climáticas del área de estudio constituye un elemento relevante en investigaciones orientadas al análisis del comportamiento ambiental de agroquímicos, dado que variables como la precipitación y la temperatura influyen directamente en procesos hidrológicos y biogeoquímicos asociados al transporte, la degradación y la persistencia de compuestos químicos en sistemas agrícolas [29].

Para el desarrollo de esta actividad, se consultaron registros climatológicos provenientes de fuentes oficiales, en particular, bases de datos meteorológicas disponibles para la región del suroccidente colombiano. Debido a la ausencia de estaciones meteorológicas cercanas a las veredas Villa Julia y Los Robles, se tomó como referencia la estación meteorológica del aeropuerto Guillermo León Valencia de la ciudad de Popayán, considerando que el área de estudio se encuentra a aproximadamente 15 minutos de esta ciudad, lo que permite asumir condiciones climáticas representativas para la zona evaluada.

A partir de esta fuente se recopilieron datos de variables climáticas de interés, principalmente precipitación y temperatura, que permiten describir las condiciones ambientales predominantes en el área donde se desarrollan las actividades agrícolas. Estas variables resultan fundamentales para comprender los procesos que influyen en la dinámica de los agroquímicos en el sistema productivo.

El área de estudio, ubicada en el municipio de Sotará, presenta condiciones propias de zonas montañosas andinas, donde factores como la altitud, la topografía y la dinámica atmosférica regional inciden en el comportamiento climático [11]. En este contexto, el régimen de lluvias y la variabilidad térmica desempeñan un papel determinante en la dinámica hidrológica del territorio y en la interacción entre el suelo, el agua y los agroquímicos empleados en los cultivos.

La precipitación es una de las variables más significativas cuando se analiza la movilidad de agroquímicos, porque los eventos de lluvia pueden facilitar el transporte de compuestos químicos hacia las fuentes superficiales de agua mediante escorrentía superficial y lixiviación. La temperatura, por su lado, afecta procesos como la descomposición de pesticidas, el comportamiento de los microorganismos y la conversión de compuestos químicos en el suelo.

En consecuencia, la información climatológica recopilada permitió establecer un marco de referencia de las condiciones ambientales del área de estudio. Estos datos fueron considerados posteriormente en el análisis del comportamiento potencial de los agroquímicos y en la interpretación de los procesos que pueden influir en su movilidad en el sistema agrícola.

Tabla 3.*Modelo para recolectar históricos de temperatura año 2024*

Mes	Temperatura mínima	Temperatura máxima

3.2.3 Actividad III. Recopilar información topográfica

Dentro de la caracterización ambiental del área de estudio, el análisis de las condiciones topográficas adquiere especial relevancia por su influencia en la dinámica del flujo superficial del agua y en los procesos de transporte de sedimentos y de sustancias químicas en sistemas agrícolas. En paisajes de ladera, la pendiente del terreno constituye un factor determinante en la generación de escorrentía superficial, fenómeno que puede favorecer el desplazamiento de agroquímicos aplicados en los cultivos hacia zonas adyacentes o hacia cuerpos de agua cercanos

Considerando lo anterior, se procedió a recopilar información topográfica de las áreas donde se localizan las fincas evaluadas en las veredas Villa Julia y Los Robles del municipio de Sotará. Esta información permitió describir las características del relieve del área de estudio y comprender el contexto geomorfológico en el que se desarrollan las actividades agrícolas asociadas al cultivo de café.

En particular, se realizaron mediciones orientadas a determinar la pendiente del terreno en las zonas cultivadas, dado que este parámetro influye directamente en la velocidad del escurrimiento superficial y en la capacidad del agua para transportar partículas del suelo y compuestos químicos presentes en la superficie[30]. De acuerdo con la literatura sobre erosión y conservación de suelos, el incremento de la pendiente puede intensificar los procesos de escorrentía y favorecer el transporte de contaminantes asociados a las actividades agrícolas [31].

Adicionalmente, la ubicación de las fincas en el contexto geográfico del municipio se analizó considerando las características del relieve regional. El territorio de Sotará presenta una topografía predominantemente montañosa, donde las actividades productivas se desarrollan con

frecuencia en zonas de ladera cercanas a drenajes naturales y pequeñas corrientes de agua. Este tipo de configuración del paisaje puede aumentar la susceptibilidad del territorio a procesos de escorrentía superficial, especialmente durante eventos de precipitación.

A partir de la información recopilada, fue posible establecer un marco de referencia de las condiciones topográficas del área de estudio. Estos elementos fueron considerados posteriormente en el análisis del comportamiento potencial de los agroquímicos aplicados en los sistemas productivos cafeteros y en la evaluación del riesgo de movilidad hacia fuentes de agua aferentes a las zonas de cultivo.

3.3 FASE III. Determinar la movilidad de agroquímicos de mayor uso a través del software PIRI

3.3.1 Actividad I. Revisión bibliográfica

La estimación del potencial de movilidad de agroquímicos hacia fuentes de agua requiere herramientas que integren las variables fisicoquímicas de los compuestos con las características ambientales del sitio de aplicación. En este contexto, el modelo PIRI ha sido desarrollado como una herramienta de evaluación del riesgo que permite estimar el potencial de transporte de plaguicidas hacia aguas superficiales y subterráneas mediante la integración de parámetros del compuesto y de variables ambientales.

El modelo PIRI fue diseñado inicialmente en Australia, en el año 1996 por el Dr. Rai Singh Kookana, el Dr. Raymond Leslie Correll y la Dra. Rosalind B Miller como una herramienta de apoyo para evaluar el riesgo ambiental asociado al transporte de pesticidas hacia cuerpos de agua, la metodología científica de PIRI se encuentra publicada en la revista internacional *Water Air and Soil* [32], [6]. Como un sistema de clasificación comparativa que combina información sobre propiedades intrínsecas del plaguicida, como la solubilidad en agua, el coeficiente de adsorción al carbono orgánico (K_{oc}) y la vida media en el suelo (DT_{50}), con variables del entorno, tales como la pendiente, la precipitación, la distancia a cuerpos de agua y las características del A diferencia de modelos mecanicistas complejos, PIRI se fundamenta en un enfoque de índice que permite categorizar el riesgo relativo de movilidad según escenarios específicos de aplicación.

La selección del modelo PIRI en esta investigación responde a tres criterios principales. En primer lugar, permite la integración de variables edafológicas, climatológicas y topográficas,

previamente caracterizadas en fases anteriores del estudio. En segundo lugar, este modelo ha sido empleado en contextos agrícolas para evaluar el potencial de transporte de plaguicidas hacia cuerpos de agua superficiales, lo que se alinea con el objetivo de estimar la movilidad hacia fuentes aferentes en el municipio de Sotará. En tercer lugar, su estructura comparativa posibilita la priorización de compuestos según su susceptibilidad relativa al desplazamiento, sin requerir modelaciones hidrológicas detalladas que exceden el alcance de este trabajo[33].

El modelo considera que el transporte hacia aguas superficiales se produce principalmente por escorrentía, un proceso que depende de la interacción entre la intensidad de la lluvia, la pendiente del terreno y las características del suelo. Por su parte, el potencial de lixiviación hacia aguas subterráneas está asociado a la solubilidad del compuesto y a su afinidad por el carbono orgánico del suelo, variables ampliamente reconocidas en la literatura como determinantes del destino ambiental de los plaguicidas. En este sentido, PIRI integra principios establecidos en estudios de adsorción y de transporte de pesticidas y los aplica como una herramienta práctica de evaluación comparativa [34].

El modelo PIRI no pronostica niveles precisos en cuerpos de agua, sino que brinda una categorización del potencial de impacto relativo bajo condiciones particulares de aplicación. Por lo tanto, los resultados son una estimación comparativa de la probabilidad de no constituyen una prueba directa de contaminación y movilidad. Esta diferencia es importante porque la investigación actual no realizó el seguimiento de residuos en el agua, sino que llevó a cabo una evaluación predictiva fundamentada en datos técnicos de la ubicación y de los compuestos empleados.

La revisión bibliográfica permitió identificar las variables de entrada necesarias para el modelo. Asimismo, se confirmó su aplicabilidad en sistemas agrícolas de ladera, como los presentes en el municipio de Sotará. Sin embargo, se identificaron limitaciones inherentes al modelo, especialmente su dependencia de la calidad de los datos de entrada y su naturaleza simplificada en comparación con modelos hidrológicos más complejos.

En consecuencia, la adopción del modelo PIRI en esta investigación responde a un criterio de coherencia metodológica con el objetivo general de estimar la movilidad potencial de agroquímicos, integrando la información obtenida en las fases de diagnóstico productivo y de caracterización ambiental.

3.3.2 Actividad II. Procesamiento de información en el software PIRI

Una vez consolidada la información sobre los ingredientes activos identificados en el diagnóstico del uso de agroquímicos, así como sobre las variables ambientales del área de estudio, se procedió al procesamiento de los datos con el software PIRI. En esta etapa se organizaron los datos recopilados en las fases anteriores con el propósito de preparar la información necesaria para el análisis en el modelo. Particularmente, se consideraron los ingredientes activos identificados en los productos utilizados por los caficultores, así como los parámetros ambientales relacionados con las condiciones edafológicas, climatológicas y topográficas del área de estudio (Figura 9). La integración de estas variables permite al modelo estimar el potencial de transporte de los pesticidas hacia fuentes de agua superficial, considerando procesos como la escorrentía y la interacción de los compuestos con el suelo.

Dentro del proceso de análisis, el modelo utiliza parámetros relacionados con las propiedades del pesticida y las condiciones del sitio de aplicación para generar un índice de impacto potencial que permite estimar de forma relativa el riesgo asociado a la movilidad de los compuestos químicos evaluados (Figura 10). De esta manera, el software facilita la comparación entre diferentes ingredientes activos y permite identificar aquellos con mayor probabilidad de transportarse hacia los recursos hídricos.

Finalmente, el procesamiento de la información mediante el modelo PIRI permitió obtener un conjunto de resultados que posteriormente se utilizaron para analizar el comportamiento potencial de los agroquímicos en el área de estudio y evaluar su posible influencia en las fuentes de agua aferentes a las zonas de cultivo de café.

Figura 9.

Software Pesticide Impact Rating Index PIRI

20/03/2026 - PIRI-English1.6 Pesticide Impact Rating Index: fruta_citrica

File Edit Tools Help

☒ Ground Water, toxicity impact ☐ Ground Water, mobility impact
☒ Surface Water, toxicity impact ☒ Surface Water, mobility impact

PIRI-English1.6 Land Use Information: fruta_citrica

Uso del suelo	fruta_citrica
Tipo de suelo	silt
La materia orgánica	% organic matter
Mes de inicio para el periodo de interés (incluido)	November
Mes de finalización para el periodo de interés (incluido)	December
Cobertura	covered ground
Indicación de la gravedad de la pérdida de suelo durante el periodo de interés	strong evidence of sheet water eros
Condiciones de humedad del suelo durante el periodo de interés	wet
Contenido de materia orgánica (%)	25.40
Precipitación total durante el periodo de interés (mm)	124
Irigación total durante el periodo de interés (mm)	123
pH del suelo	5.18
Media de la temperatura mínima del usa durante el periodo de interés (grados C)	16
Media de la temperatura máxima del usa durante el periodo de interés (grados C)	24
Diámetro del cuerpo de agua más cercano (metros)	23
Distancia desde el borde del cultivo al cuerpo de agua (metros)	9
Pendiente del terreno al cuerpo de agua	96.0000005582 degrees
Ancho de la zona buffer y amariguadora (metros)	6
Número número de días a partir de la aplicación del pesticida y la primera lluvia irigación	35

Click here to save information to Land Use (.inf) & Application (.dat) files.
Change the name to save in a different land use file.

Please select a value from the drop down list for Tipo de suelo.

Abort process Update land use information Update application information

Current data: Directory: D:\TO MARIAPIYI Land Use: Cultivo.inf
Pesticide information: Información_sobre_el_pesticida.dtf Application information: fruta_citrica.dat

Figura 10.

Selección de agroquímicos para estimar movilidad en cultivo de café

20/03/2026 - PIRI-English1.6 Pesticide Impact Rating Index: fruta_citrica

File Edit Tools Help

Select pesticides Remove ALL pesticides 8 Pesticides Selected

PIRI-English1.6 Application information: fruta_citrica

Delete	Pesticida	Dosis de aplicación del producto kg o L/ha	Fracción del ingrediente activo	Frecuencia de uso (tiempo periodo de interés)	Porcentaje del área tratada	Clasificación	Tipo de aplicación o tamaño
Delete	glifosato	4	0.38	2	100	Herbicida	Ground sprayed
Delete	benomilo	2	0.5	1	100	Fungicida	240-20 microns
Delete	paraquat	2.8	0.135	2	100	Herbicida	320-20 microns
Delete	etefton	1.4	0.48	1	100	Fungicida	320-20 microns
Delete	mancozeb	6	0.75	3	100	Fungicida	240-20 microns
Delete	bifenrina	0.125	0.08	1	100	Insecticida	80-20 microns
Delete	propanilazol	0.75	0.25	4	100	Fungicida	320-20 microns
Delete	atamectina	0.75	0.058	1	100	Insecticida	240-20 microns

Click here to save information to Application (.dat) & Pesticide (.dtf) files.
Change the name to save in a different application information file.

Please select a value from the drop down list for Tipo de aplicación o tamaño de gota.

Abort process Update land use information Update application information Calculate pesticide risk

Current data: Directory: D:\TO MARIAPIYI Land Use: Cultivo.inf
Pesticide information: Información_sobre_el_pesticida.dtf Application information: fruta_citrica.dat

Capítulo 4. Resultados y Discusión

4.1 FASE I. Diagnóstico del uso de agroquímicos en el proceso de cultivo de café

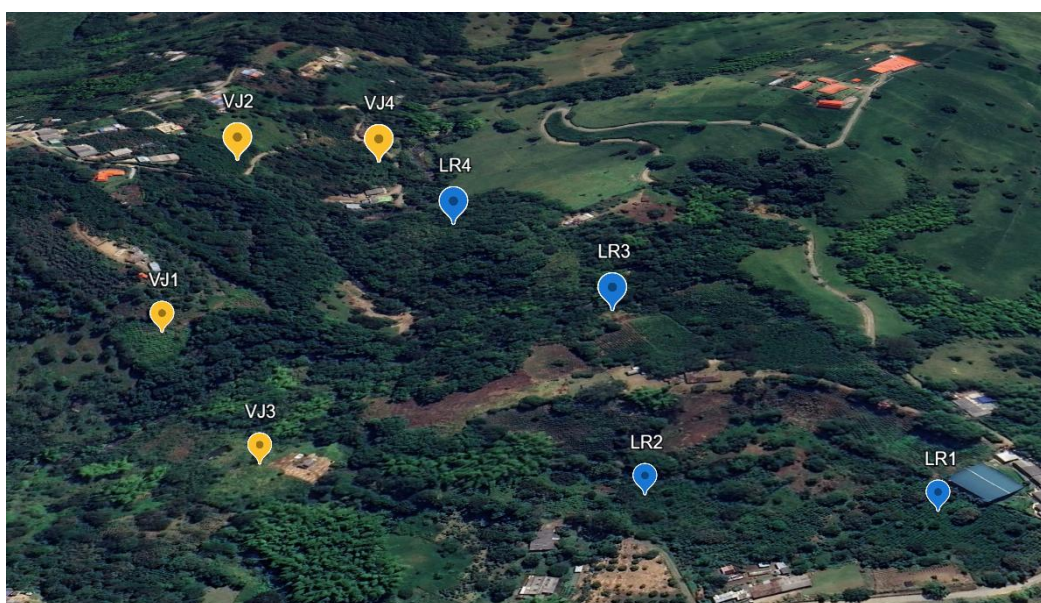
4.1.1. Actividad I. Delimitación del área de estudio

La delimitación del área de estudio permitió identificar las unidades productivas en las que se realizó el diagnóstico del uso de agroquímicos en el cultivo de café. Como resultado de este proceso, se seleccionaron fincas cafeteras ubicadas en las veredas Villa Julia y Los Robles, del municipio de Sotará, en el departamento del Cauca. Ambas veredas se encuentran en el entorno rural cercano a la ciudad de Popayán, en una región caracterizada por sistemas productivos cafeteros establecidos en zonas de ladera.

La identificación de las fincas incluidas en el estudio permitió establecer los espacios donde se desarrollan las prácticas agrícolas analizadas en la investigación. En total se consideraron ocho unidades productivas, distribuidas entre las dos veredas seleccionadas. Cuatro de estas fincas corresponden a la vereda Villa Julia, identificadas como VJ1, VJ2, VJ3 y VJ4, mientras que las restantes se ubican en la vereda Los Robles, identificadas como LR5, LR6, LR7 y LR8 (Figura 11).

Figura 11.

Mapa de ubicación de veredas cafeteras Vda. Los Robles y Vda. Villa Julia



La distribución de las fincas en el área de estudio permitió abarcar diferentes unidades productivas representativas del sistema cafetero local. A partir de esta delimitación, fue posible desarrollar actividades de recopilación de información sobre el manejo del cultivo y el uso de agroquímicos, así como la caracterización de las condiciones ambientales en las áreas evaluadas.

Desde una perspectiva espacial, la localización de las fincas en zonas de relieve montañoso constituye un aspecto relevante para el análisis posterior del comportamiento ambiental de los agroquímicos. Las características topográficas propias de la región pueden influir en la dinámica del agua superficial y, en consecuencia, en los procesos de transporte de sustancias químicas aplicadas en los cultivos. En este sentido, la delimitación del área de estudio no solo permitió definir los puntos de análisis del diagnóstico agrícola, sino también establecer el contexto territorial necesario para interpretar los resultados obtenidos en las fases posteriores de la investigación.

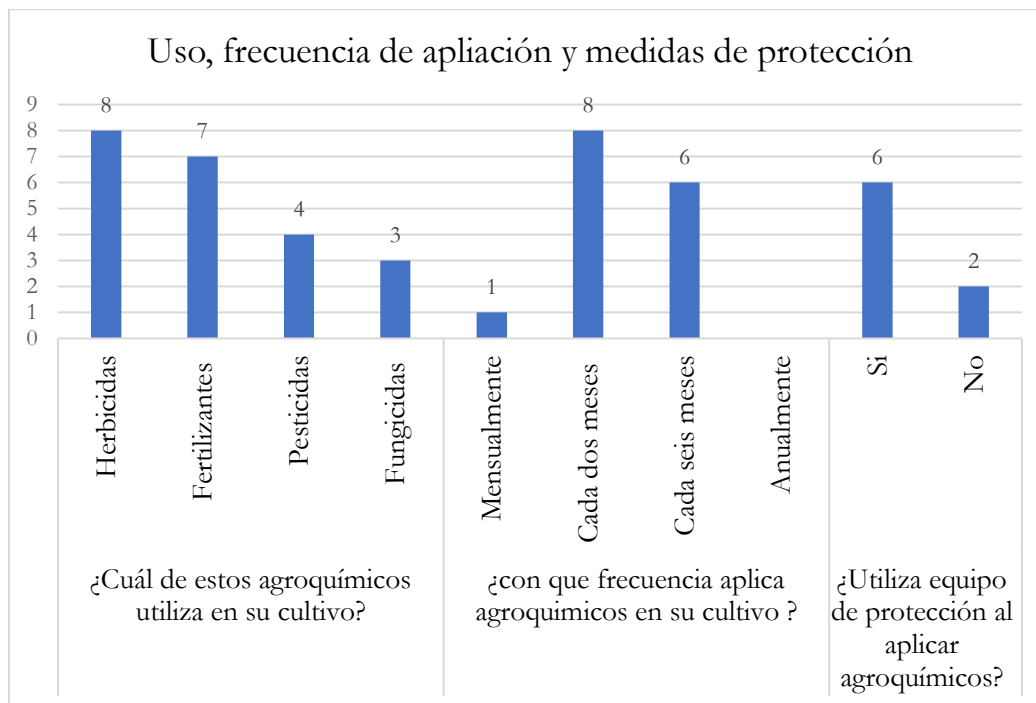
4.1.2. Actividad II. Recopilación de información

La recopilación de información primaria se realizó mediante la aplicación de una encuesta estructurada a 8 caficultores distribuidos en las veredas Villa Julia y Los Robles, con el propósito de caracterizar las prácticas de uso, manejo y frecuencia de aplicación de agroquímicos en el sistema productivo evaluado. Para la sistematización de las encuestas se llevó a cabo por 4 componentes de interés.

En primer lugar, se identificó que el uso de herbicidas y fertilizantes es más frecuente que el de otros productos, como fungicidas e insecticidas. Esta tendencia indica que el manejo agronómico en las fincas evaluadas se orienta principalmente al control de arvenses y al mantenimiento de la fertilidad del suelo. Resultados similares han sido reportados en sistemas cafeteros de Colombia, donde el uso de herbicidas constituye una práctica ampliamente adoptada debido a la competencia por nutrientes en cultivos establecidos en zonas de ladera [35], La frecuencia de aplicación predominante es cada dos meses, lo que indica la adopción de esquemas de manejo periódico. Este patrón puede deberse tanto a las condiciones del cultivo como a prácticas tradicionales, que a menudo responden a rutinas establecidas por los productores en lugar de criterios técnicos específicos (ver figura 12).

Figura 12.

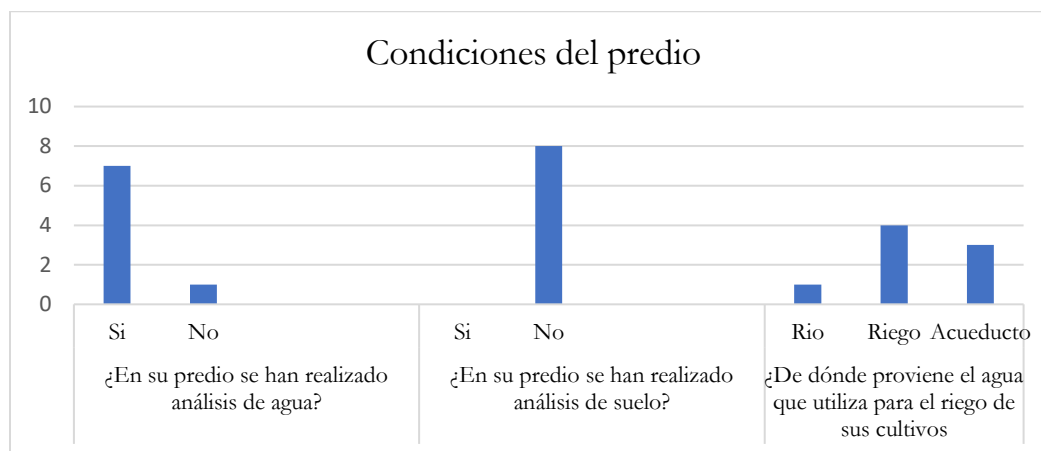
Uso, frecuencia de aplicación y medidas de protección en el manejo de agroquímicos en las fincas cafeteras



En relación con las condiciones del predio, se observó que, si bien la mayoría de los productores ha realizado análisis de agua, una proporción considerable no ha efectuado análisis de suelo. Esta falta de información limita la toma de decisiones fundamentadas sobre el manejo de nutrientes y el uso apropiado de insumos agrícolas. Este aspecto es relevante, ya que diversos estudios han señalado que la ausencia de información edáfica puede conducir a un uso ineficiente de agroquímicos y a un mayor riesgo de impactos ambientales. En cuanto al origen del agua empleada en los cultivos, se observó una marcada dependencia de fuentes como el riego y el acueducto, mientras que el uso directo de fuentes naturales, como los ríos, fue considerablemente menor. Este aspecto es relevante en el contexto del estudio, ya que tanto la calidad como la disponibilidad del agua pueden afectar los procesos de transporte de agroquímicos en el sistema agrícola (ver figura 13).

Figura 13.

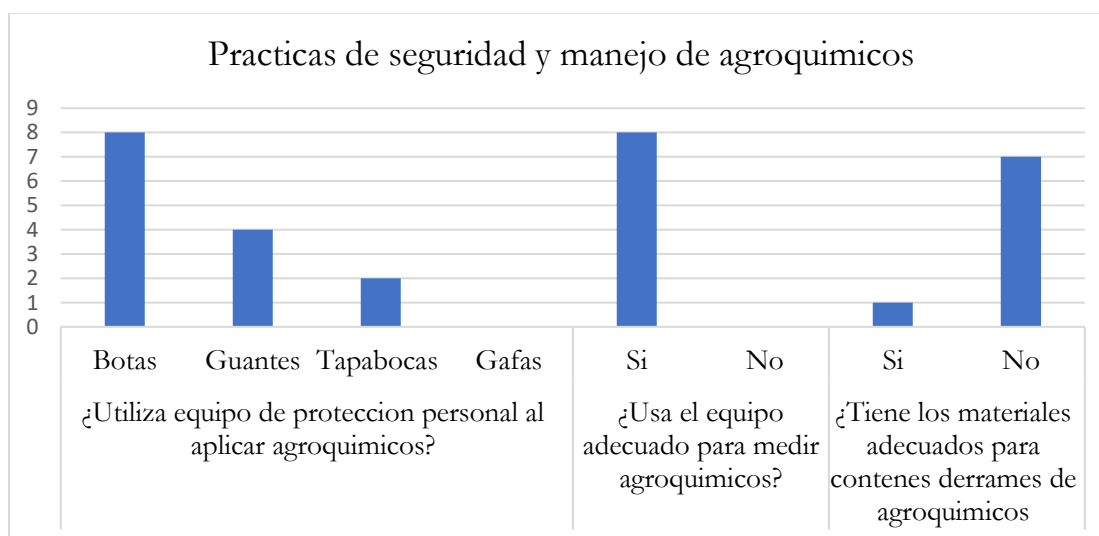
Caracterización de las condiciones del predio: análisis de agua, suelo y fuentes de abastecimiento



El análisis de las prácticas de manejo reveló que, si bien el uso de ciertos elementos de protección personal, como botas, es generalizado, la utilización de otros, como guantes o tapabocas, resulta menos común. Además, se observó que todos los productores emplean herramientas para la medición de agroquímicos, lo que constituye un avance positivo en el control de dosis. No obstante, la escasa disponibilidad de materiales para la contención de derrames indica debilidades en la gestión del riesgo asociado al manejo de estos productos (ver figura 14).

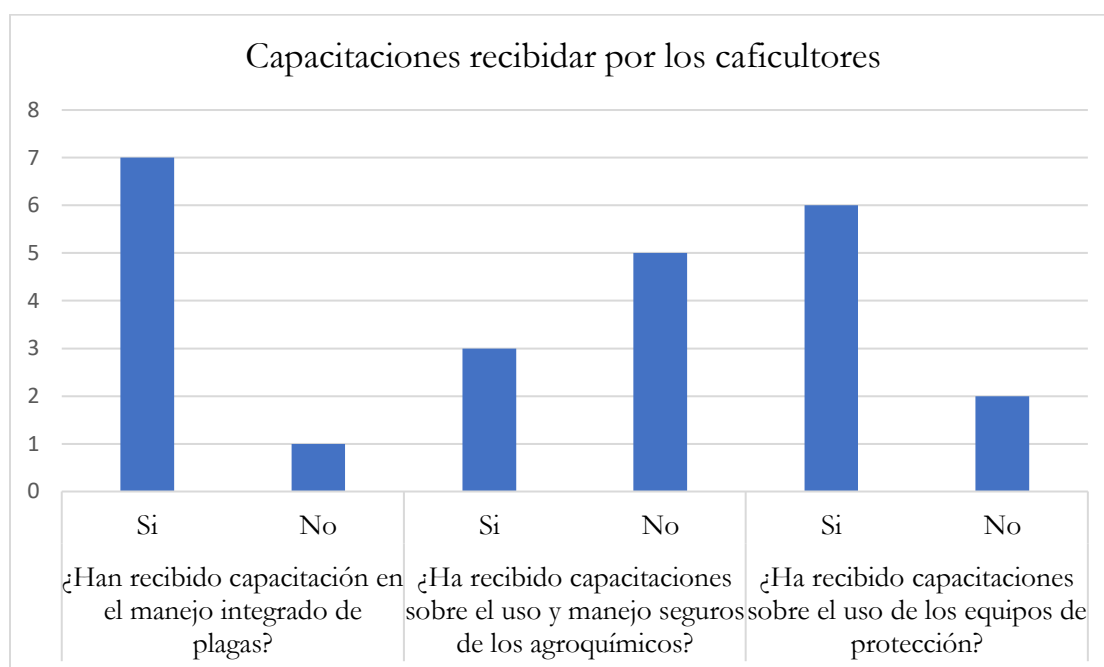
Figura 14.

Prácticas de seguridad y manejo de agroquímicos en las fincas evaluadas



En cuanto a la capacitación, se observó que la mayoría de los caficultores ha recibido formación en manejo integrado de plagas, mientras que la instrucción en el uso seguro de agroquímicos es menos frecuente. Esta diferencia indica que, aunque existe conocimiento técnico en aspectos productivos, persisten vacíos en temas de seguridad y manejo ambiental de los insumos agrícolas. En conjunto, los resultados muestran que el uso de agroquímicos en las fincas evaluadas corresponde a prácticas habituales en sistemas cafeteros, pero también destacan la necesidad de fortalecer la capacitación y el acompañamiento técnico, especialmente en el manejo seguro y la reducción de impactos ambientales. Esta caracterización proporciona una base fundamental para el análisis posterior del comportamiento y la movilidad potencial de los agroquímicos en el área de estudio (ver figura 15).

Figura 15. Nivel de capacitación de los caficultores en el manejo integrado de plagas y uso seguro de agroquímicos



En conjunto, los resultados muestran que el uso de agroquímicos en las fincas evaluadas corresponde a prácticas habituales en sistemas cafeteros, pero también destacan la necesidad de fortalecer los procesos de capacitación y acompañamiento técnico, especialmente en lo referente al manejo seguro y la reducción de impactos ambientales. Esta caracterización representa un insumo esencial para el análisis posterior del comportamiento de los agroquímicos y su potencial de movilidad en el área de estudio.

4.1.3 Actividad III. Caracterización de agroquímicos

Con base en la información obtenida a través de encuestas y ficha de caracterización aplicadas a caficultores de las veredas Villa Julia y Los Robles, se identificaron y analizaron los agroquímicos empleados en el manejo del cultivo de café. Este procedimiento permitió determinar tanto los productos utilizados como los ingredientes activos asociados, sus condiciones de uso y su función dentro del sistema productivo.

Los hallazgos indican el empleo de una extensa variedad de insumos agrícolas, entre ellos Fertilizantes, fungicidas, insecticidas, herbicidas y reguladores del crecimiento. Dentro de los productos Daconil, Zellus, Dithane y Tilt son algunos de los reportados, vinculados con ingredientes activos como propiconazol, benomil, mancozeb y clorotalonil, que se usan sobre todo para controlar patologías. Además, se detectaron herbicidas como Roundup Activo, GlifoCafé y Gramoxone, que contiene paraquat y glifosato como ingredientes activos, se emplea para controlar las malas hierbas.

Respecto al manejo fitosanitario, se observó que el uso de fungicidas se orienta principalmente a la prevención y control de enfermedades como la roya del café [36], especialmente en periodos de alta humedad. Este patrón coincide con lo reportado por la Federación Nacional de Cafeteros, que indica que la aplicación de fungicidas es una práctica común en zonas cafeteras donde las condiciones climáticas favorecen el desarrollo de patógenos. Por lo tanto, las aplicaciones identificadas en las fincas evaluadas responden a dinámicas propias de los sistemas de ladera y a condiciones ambientales variables [37].

El control de malezas se lleva a cabo principalmente mediante herbicidas de amplio espectro, como glifosato y paraquat, aplicados durante las etapas de crecimiento activo de la vegetación espontánea[38]. Esta práctica concuerda con estudios en sistemas agrícolas tropicales, donde el uso de herbicidas es una de las estrategias más utilizadas para reducir la competencia por nutrientes y optimizar el desarrollo del cultivo [39]. Sin embargo, la utilización de compuestos como el paraquat, clasificado como altamente peligroso, resalta la necesidad de fortalecer las medidas de manejo seguro.

Para el control de plagas, se identificó el uso de insecticidas como clorpirifos, bifentrina y abamectina, presentes en productos como Lorsban, Talstar y Vertimec. Estos compuestos se aplican principalmente cuando se detecta la presencia de organismos que afectan el cultivo, lo que

indica un manejo basado en la observación directa del sistema productivo. Estas prácticas se relacionan con esquemas de manejo integrado de plagas, en los cuales las aplicaciones se realizan en función de la presencia de infestaciones y no según un calendario fijo.

Además, se observó el uso de productos relacionados con el desarrollo fisiológico del cultivo, como reguladores de crecimiento (Ethrel) y fitohormonas (Rebrote), así como fertilizantes como la urea, aplicados en momentos específicos del ciclo productivo, tales como la floración, el llenado del grano o el inicio del rebrote. Estas prácticas evidencian un enfoque dirigido a optimizar la productividad y la calidad de la cosecha.

En cuanto a la aplicación, la mayoría de los agroquímicos se utilizan mediante fumigación o aspersión foliar con equipos convencionales. Se identificó también el uso de elementos de protección personal como botas, guantes, mascarillas y, en algunos casos, overoles impermeables. Sin embargo, la variabilidad en la utilización de estos elementos indica diferencias en la adopción de prácticas de seguridad entre los productores, aspecto señalado por la FAO como uno de los principales desafíos para el manejo adecuado de plaguicidas en sistemas agrícolas[40]. En relación con el almacenamiento, los agroquímicos se resguardan principalmente en bodegas de herramientas o espacios destinados a insumos agrícolas, generalmente ventilados y separados de otros materiales. No obstante, en algunos casos se observaron condiciones que pueden representar riesgos, como la ausencia de sistemas de almacenamiento especializados o de medidas de control adicionales, lo cual coincide con lo documentado en estudios sobre el manejo de plaguicidas en contextos rurales [41].

En síntesis, la caracterización realizada permitió identificar una diversidad de ingredientes activos y prácticas asociadas a su uso, lo que evidencia un manejo agrícola fundamentado en la experiencia del productor y en las condiciones específicas del cultivo. Esta información representa un insumo esencial para la siguiente fase del estudio, al definir los compuestos a evaluar en el modelo PIRI y facilitar el análisis del potencial de movilidad de los agroquímicos hacia las fuentes de agua del área de estudio (ver tabla 4).

Tabla 4.*Resultados caracterización de agroquímicos*

CARACTERIZACIÓN DE AGROQUÍMICOS									
Nombre del agroquímico	Ingrediente activo	Categoría Toxicología	Presentación	Forma de aplicación	Dosis recomendada	Frecuencia de aplicación (veces/año)	Momentos de aplicación	Equipo de protección utilizado	Almacenamiento y manejo
Daconil	Clorotalonil	II- Moderadamente peligroso	Líquido	Fumigación	2.5 L x ha	3	Temporada de lluvias, aplicaciones subsecuentes cada 10-20 días	Botas plásticas	Bodega de herramientas
Rebrote	Fitohormonas	IV Toxicidad agua-oral	Polvo		2 Kgx ha	2	Inicio del rebrote, aplicaciones posteriores cada 20-30 días	Botas plásticas	Bodega de herramientas
Zellus	Benomyl	III- Ligeramente peligroso	Polvo mojable	Fumigación	2L x ha	1	Inicio de crecimiento, repetir aplicación cada 20-30 días	Botas plásticas	Bodega de herramientas
GlifoCafé	Glifosato	II- Moderadamente peligroso	Líquido	Fumigación	4L x ha	2	Primera etapa desarrollo de la maleza, aplicación posterior depende de infestación de la maleza	Botas plásticas, mascarilla	Bodega de herramientas

Fluyex	Alcohol etoxilado modificado	IV - Ligeramente peligroso	Líquido	Fumigación	2L x ha	1	Inicio de temporada de crecimiento	Botas plásticas, mascarilla	Bodega de herramientas
Urea	Nitrogeno	NO		Aplicación foliar	200 gr	1	Después de las cosechas, antes de la floración, durante el llenado del grano		Bodega de herramientas
Roundup Activo	Glifosato	III- Ligeramente peligroso	Líquido	Fumigación	4 L X ha	3	Maleza en etapa de crecimiento	Botas plásticas, mascarilla	Bodega de herramientas
Lorsban	Clorpirifos	Ligeramente peligroso	Polvo	Espolvoreo	2L x ha	1	Cuando se observe la presencia de plagas, aplicación posterior en caso de infestación grave o recurrente	Botas plásticas, mascarilla	Bodega de herramientas
Gramoxone	Paraquat	II-Altamente peligroso	Líquido	Aspersión dirigida	2-3 L/ha	1	Malezas en crecimiento activo	Overol impermeable, guantes, careta facial	Bodega segura, bajo llave
Ethrel	Etefon	III – Ligeramente peligroso	Líquido	Aspersión foliar	1-2 L/ha	1	Uniformidad de maduración	Botas, guantes, gafas	Lugar fresco y seco

Dithane	Mancozeb	III – Ligeramente peligroso	Polvo mojable	Aspersión foliar	2–3 kg/ha	2	Temporada de lluvias, prevención de roya	Botas, guantes, overol, mascarilla	Bodega ventilada, envase original cerrado
Talstar	Bifentrina	II – Moderadamente peligroso	Líquido	Aspersión foliar	0.3–0.5 L/ha	2	Presencia de plagas (Broca)	Botas, guantes, gafas, mascarilla	Lugar ventilado y seguro
Tilt	Propiconazol	II – Moderadamente peligroso	Líquido	Aspersión foliar	0.5 L/ha	2	Aparición de síntomas de roya	Botas, guantes, gafas, mascarilla	Lugar seco, lejos de alimentos
Vertimec	Abamectina	II – Moderadamente peligroso	Líquido	Aspersión foliar	0.6 L/ha	2	Presencia de ácaros o minadores	Botas plásticas, guantes, mascarilla	Bodega de agroquímicos

4.1.4 Actividad 4. Análisis de información

El análisis integrado de la información obtenida en la Fase I permite identificar no solo las prácticas de uso de agroquímicos, sino también la estructura funcional del sistema productivo cafetero en las veredas de Villa Julia y Los Robles. Más allá de la simple presencia de determinados ingredientes activos, los resultados evidencian un esquema de manejo agronómico basado en la intervención química periódica como estrategia principal de control fitosanitario y de manejo de arvenses.

La coexistencia de herbicidas, insecticidas y fungicidas en un mismo ciclo productivo indica que el sistema agrícola evaluado presenta múltiples oportunidades de aplicación química a lo largo del año. Esta diversificación de productos no implica necesariamente una mayor peligrosidad. Sin embargo, incrementa la complejidad del comportamiento ambiental, ya que cada ingrediente activo responde de manera distinta al suelo, a la pendiente y a la precipitación. Por lo tanto, el riesgo potencial no puede analizarse solo por producto, sino como resultado de la interacción acumulativa de aplicaciones sucesivas [42].

Un elemento importante es la regularidad en la frecuencia de aplicación. La periodicidad semestral es la más común, si bien algunos productos necesitan aplicaciones extra esta práctica supone una incesante introducción de agroquímicos en el terreno. A partir desde un punto de vista medioambiental, la recurrencia es fundamental, pues la persistencia residual de un compuesto puede ser compatible con nuevas aplicaciones, lo que puede provocar la coincidencia de cargas químicas en el perfil del suelo. Cuando las las aplicaciones concuerdan con intervalos de precipitación más abundante.

El análisis muestra una contradicción estructural, dado que, aunque el 100 % de los productores informan que han sido instruidos tecnológicamente en la gestión de agroquímicos detectan flaquezas constantes en la aplicación de medidas preventivas, particularmente en el empleo correcto de dispositivos de protección y en la ausencia de monitoreo del agua. Esta disparidad indica que el conocimiento formal no se convierte siempre en prácticas preventivas en el ámbito medioambiental. En términos de gestión ambiental, la ausencia de El análisis de agua reduce la habilidad de detectar a tiempo posibles procesos de transporte hacia fuentes de agua, lo que hace que la evaluación del riesgo se mantenga en un nivel puramente teórico o reactivo.

La cercanía entre las zonas cultivadas y los recursos hídricos es otro componente crucial. afectantes, circunstancia que, a pesar de que no conlleva contaminación de manera automática, disminuye el recorrido que debe hacer un compuesto aplicado para llegar al sistema hídrico cuando esta proximidad se mezcla con pendientes empinadas, especialmente en la vereda Los Robles, el potencial de escorrentía superficial se vuelve más significativo como sistema de transporte.

El diagnóstico productivo, desde un punto de vista sistémico, muestra que el sistema cafetero evaluado muestra tres rasgos estructurales que aumentan la vulnerabilidad ambiental potencial: (i) usos frecuentes de varios ingredientes activos, (ii) uso mayoritario de la fumigación y (iii) falta de supervisión del agua local. Estas condiciones, por sí solas, no muestran impacto ambiental; no obstante, constituyen un panorama en el que la movilidad hacia fuentes de agua afluentes se transforma en una hipótesis técnicamente factible.

La Fase I, en este contexto, no tiene como objetivo demostrar contaminación o establecer causalidad, sino descubrir condiciones de empleo que, al combinarse con variables climáticas y físicas, tienen la capacidad de afectar cómo se transportan los agroquímicos. La investigación llevada a cabo en esta sección tiene una función de diagnóstico y fundamenta el paso a la Fase II y después modelación por medio de PIRI, en la cual se examinarán estas condiciones desde una perspectiva comparativa de la susceptibilidad ambiental. Por lo tanto, el examen conjunto de los datos productivos no es un objetivo en sí mismo, sino la base empírica que respalda la evaluación del potencial de movilidad elaborada en las etapas posteriores de la investigación.

Así, el análisis integrado de la información productiva no constituye un fin en sí mismo, sino el fundamento empírico que sustenta la estimación del potencial de movilidad desarrollada en las fases siguientes del estudio.

4.2 FASE II. Caracterizar las condiciones edafológicas, climatológicas y topográficas de la zona

4.2.1. Actividad I. Recopilar información edafológica

La caracterización edafológica de las ocho fincas permitió identificar condiciones comunes del suelo en el área de estudio, así como diferencias específicas entre los predios,

especialmente en los contenidos de humedad y materia orgánica. En contraste, el pH presentó un comportamiento uniforme entre las fincas analizadas.

Respecto a la reacción del suelo, los valores de pH registrados (Tabla 5) se ubicaron en un rango ácido, entre 4,51 y 5,40, con baja variabilidad entre los puntos de muestreo. Este comportamiento indica que, en términos generales, los suelos de las veredas Villa Julia y Los Robles presentan condiciones químicas similares. Este resultado coincide con lo reportado para sistemas cafeteros de montaña en Colombia, donde predominan suelos ácidos asociados a procesos de lixiviación y condiciones climáticas húmedas [43].

El carácter ácido del suelo influye en la dinámica de los agroquímicos, ya que afecta procesos como la solubilidad, la adsorción y la degradación de compuestos. En terrenos con un pH bajo, algunos ingredientes activos pueden presentar una estabilidad más alta o cambiar su disponibilidad, lo que afecta su actuación en términos ambientales. No obstante, debido a que el rango de variación del pH entre fincas es pequeño, este parámetro representa una condición general del sistema y no un elemento que lo distinga localmente. Por ende, no es crucial para explicar las diferencias particulares en el comportamiento de los agroquímicos entre propiedades.

Tabla 5.

Resultado de pH para cada una de las fincas muestreadas

FINCA	pH		
	M1	M2	M3
VJ1	4.68 ± 0.35	4.66 ± 0.58	4.51 ± 0.39
VJ2	4.65 ± 0.31	4.63 ± 0.22	4.90 ± 0.36
VJ3	5.19 ± 2.25	5.18 ± 0.12	5.40 ± 0.42
VJ4	5.1 ± 0.45	5.00 ± 0.21	4.88 ± 0.12
LR5	4.88 ± 0.28	5.05 ± 0.54	4.81 ± 0.22
LR6	4.89 ± 0.38	4.63 ± 0.31	4.8 ± 0.23
LR7	4.73 ± 0.16	4.95 ± 0.24	4.73 ± 0.16
LR8	4.77 ± 0.22	4.9 ± 0.10	4.55 ± 0.22

El análisis del contenido de humedad (ver Tabla 6) mostró una variabilidad considerable entre las fincas, con valores que fluctuaron entre 23 % y 50 %. Esta variación indica diferencias en la capacidad de retención hídrica del suelo, probablemente relacionadas

con factores como la textura, la cobertura vegetal y las condiciones micro topográficas de cada predio. Las fincas que presentaron valores superiores al 35 % evidencian suelos con mayor contenido de agua al momento del muestreo, lo que sugiere una proximidad a condiciones de saturación.

Este aspecto es relevante desde el punto de vista hidrológico, ya que un suelo con alta humedad inicial tiene una capacidad limitada para almacenar agua adicional durante eventos de lluvia, lo que favorece la generación de escorrentía superficial. En sistemas agrícolas en ladera, como los evaluados, esta condición incrementa el riesgo de transporte de agroquímicos hacia fuentes hídricas, especialmente cuando coincide con pendientes pronunciadas [44]. En contraste, valores de humedad más bajos pueden estar asociados a una mayor capacidad de infiltración inicial, lo que alteraría la dinámica de transporte de compuestos en el suelo.

Tabla 6.

Resultado % Humedad para cada una de las fincas muestreadas

FINCA	Humedad %		
	M1	M2	M3
VJ1	30,68 ± 1,54	29,96 ± 2,62	31,04 ± 1,93
VJ2	32,29 ± 2,02	30,68 ± 39,97	36,57 ± 2,09
VJ3	23,64 ± 1,40	28,17 ± 2,50	28,36 ± 2,04
VJ4	50,56 ± 2,00	33,24 ± 2,39	33,23 ± 38,71
LR5	35,20 ± 4,52	41,60 ± 2,79	38,71 ± 2,71
LR6	35,63 ± 3,61	36,78 ± 1,13	38,53 ± 1,57
LR7	2,24 ± 1,01	38,17 ± 2,30	41,72 ± 3,34
LR8	34,68 ± 4,28	28,17 ± 2,50	38,12 ± 3,37

La materia orgánica desempeña un papel fundamental en la interacción entre el suelo y los agroquímicos, ya que constituye uno de los principales sitios de adsorción de compuestos orgánicos (ver Tabla 7). Los suelos con mayor contenido de materia orgánica tienden a retener en mayor medida ciertos agroquímicos, lo que reduce su movilidad inmediata. En contraste, en suelos con bajos contenidos de materia orgánica, estos compuestos presentan una mayor disponibilidad para el transporte, especialmente bajo condiciones de lluvia o escorrentía [45].

La variabilidad observada en la materia orgánica introduce una diferenciación funcional entre las fincas que no se observa en el pH. Este hallazgo sugiere que la materia orgánica puede ser uno de los factores edáficos más influyentes en el comportamiento diferencial de los agroquímicos en el área de estudio, al condicionar los procesos de retención, transformación y transporte

Tabla 7.

Resultado de Materia orgánica para cada una de las fincas muestreadas

FINCA	Materia Orgánica %		
	M1	M2	M3
VJ1	1.27 ± 0.67	14.66 ± 0.58	14.51 ± 0.39
VJ2	16.47 ± 8.65	14.63 ± 9.22	16.90 ± 6.36
VJ3	12.40 ± 6.53	15.18 ± 0.12	25.40 ± 8.42
VJ4	2.04 ± 1.07	3.6 ± 2.14	13.88 ± 7.12
LR5	13.18 ± 6.92	12.89 ± 5.26	12.81 ± 0.22
LR6	15.70 ± 8.25	14.56 ± 0.31	15.8 ± 0.23
LR7	14.11 ± 7.41	12.15 ± 8.15	12.73 ± 0.16
LR8	10.94 ± 5.74	15.96 ± 89.5	14.55 ± 0.22

4.2.2 Actividad II. Recolectar información climatológica

La caracterización climatológica del área de estudio se fundamentó en la recopilación de datos históricos y mensuales correspondientes al periodo en que se desarrolló el trabajo de campo (diciembre de 2024), considerando variables directamente relacionadas con la dinámica de transporte de agroquímicos: precipitación, temperatura del aire y humedad relativa. Dado que las veredas Villa Julia y Los Robles no cuentan con estación meteorológica propia, se emplearon registros oficiales de estaciones cercanas del IDEAM ubicadas en Popayán y Timbío, por su proximidad geográfica y similitud altitudinal, lo que permite una aproximación representativa de las condiciones locales.

El estudio de las precipitaciones del mes de diciembre de 2024 muestra acumulados por mes. de 120 a 130 mm en las estaciones de referencia, con una distribución no uniforme durante el mes. Esta conducta es consistente con el régimen bimodal que caracteriza al suroccidente de Colombia, donde diciembre es un mes de transición posterior a la segunda

estación de lluvias del año. La ocurrencia de eventos lluviosos que se concentran en la posibilidad de que se produzca escorrentía superficial aumenta en unos pocos días. Particularmente en terrenos con una inclinación significativa, como los que se describen en la Fase II.

Desde la perspectiva de la movilidad potencial, no es únicamente el total mensual de precipitación el que determina el riesgo de transporte, sino también la intensidad y la frecuencia de los eventos pluviométricos, pues las lluvias de alta intensidad pueden superar la capacidad de infiltración del suelo y favorecer el arrastre de partículas y compuestos adsorbidos.

En cuanto a la temperatura, los registros promedio mensuales se situaron entre 18 °C y 20 °C en diciembre de 2024, con máximas cercanas a 24 °C y mínimas entre 10 y 12 °C. Este rango térmico es consistente con sistemas cafeteros de montaña ubicados entre 1.800 y 1.900 m s. n. m. La temperatura influye indirectamente en la dinámica ambiental de los agroquímicos al afectar los procesos de degradación química y biológica del suelo. En términos generales, las temperaturas moderadas favorecen una actividad microbiana estable, lo que puede acelerar la transformación de ciertos compuestos, aunque este efecto depende de la naturaleza específica del ingrediente activo (ver Tabla 8).

Tabla 8.

Temperatura promedio para los meses de julio – diciembre 2024

Mes	Temperatura mínima	Temperatura máxima
Julio	12°C	20°C
Agosto	11°C	22°C
Septiembre	11°C	23°C
Octubre	10°C	21°C
Noviembre	11°C	24°C
Diciembre	12°C	23°C

Fuente : IDEAM [46]

La humedad relativa promedio durante diciembre se registró entre 75 y 80 %, con variaciones diarias asociadas a la dinámica de nubosidad propia de la región andina. Altos niveles de humedad atmosférica pueden prolongar el tiempo de permanencia de la película líquida sobre la superficie foliar y el suelo tras eventos de precipitación o de aplicación, lo que puede influir en la redistribución superficial de los agroquímicos recién aplicados. Asimismo, una atmósfera húmeda reduce la evaporación rápida de las soluciones aplicadas, lo que aumenta la probabilidad de infiltración inicial en el suelo.

El análisis de estas variables sugiere que, a lo largo del periodo de muestreo, el área en estudio tuvo un clima favorable para que se activaran los procesos de transporte superficial. Los compuestos que se aplican en el suelo tienen la posibilidad de estar expuestos a procesos de degradación y mecanismos de movilización lateral en un contexto donde ocurren precipitaciones mensuales importantes, episodios de lluvia concentrada, temperaturas moderadas y alta humedad relativa. En este escenario, la precipitación surge como el factor con mayor potencial de incidencia en la creación de escorrentía, especialmente si está presente en suelos con un contenido hídrico previo significativo y pendientes empinadas, tal como se demostró al caracterizar los suelos.

Desde un punto de vista de resultados, los datos meteorológicos recolectados no muestran un efecto directo sobre las fuentes hídricas; sin embargo, sí determinan las condiciones ambientales en las que podría tener lugar el traslado de agroquímicos. La combinación de pendientes empinadas, la cercanía de cuerpos acuáticos a las zonas de cultivo y acumulados de lluvia que superan los 100 mm en diciembre indica que el sistema tiene una sensibilidad hidrológica adecuada para sustentar la evaluación cuantitativa utilizando el modelo PIRI. Por ende, la caracterización climática es un insumo esencial para entender la movilidad potencial no como un acontecimiento aislado, sino como el producto de una interacción dinámica entre el clima, el suelo, la topografía y las prácticas agrícolas.

En resumen, el análisis climatológico muestra que el periodo analizado se llevó a cabo en condiciones características de la zona andina del Cauca, con precipitaciones moderadas, temperaturas constantes y una alta humedad relativa. Estas variables, cuando se toman en cuenta junto con los parámetros edafológicos analizados anteriormente, fortalecen

la hipótesis de vulnerabilidad ambiental planteada en el estudio y brindan el marco climático requerido para la modelación comparativa que fue realizada en la Fase III.

4.2.3 Actividad III. Recopilar información topográfica

Se fundamenta en las mediciones directas realizadas en el campo entre diciembre de 2024 y la fecha de la investigación, en las veredas Los Robles y Villa Julia, la descripción topográfica de la región analizada. La georreferenciación se utilizó para registrar la altitud en cada uno de los puntos de muestreo. Se calculó la pendiente usando la relación entre la diferencia vertical y la distancia horizontal, expresando el gradiente en términos de porcentaje.

En la vereda Villa Julia se registró una altitud aproximada de 1810 m s. n. m., ubicando el sistema productivo dentro del rango altitudinal típico del café de montaña en el suroccidente colombiano. Las mediciones de pendiente en esta vereda arrojaron valores de 29,86 %, 8,00 % y 46,80 %, con un promedio de 28,22 %. Este promedio indica que el relieve dominante corresponde a una ladera fuertemente inclinada. Sin embargo, la dispersión de los valores individuales evidencia heterogeneidad entre predios: mientras que una medición se aproxima a una pendiente moderada (8 %), otra supera el 45 %, lo que sugiere microrelieves con gradientes variables dentro de un mismo entorno productivo.

Desde una perspectiva geomorfológica, esto significa que por cada metro de distancia horizontal hay un aumento de aproximadamente 0,30 metros. Cuando la intensidad de la lluvia sobrepasa el límite de infiltración del terreno, esta pendiente es suficiente para promover la escorrentía superficial. Cuando la inclinación es mayor al 20 % en terrenos agrícolas, el potencial erosivo aumenta de manera gradual, especialmente si el suelo tiene una cobertura parcial o alteraciones vinculadas con prácticas culturales. La existencia de sectores con una mayor propensión al transporte lateral se ve reforzada por la presencia de valores alrededor del 46 % en Villa Julia.

En contraste, la vereda Los Robles presentó valores significativamente más altos. Las mediciones realizadas arrojaron pendientes individuales de 156,15 % y 158,47 %, con un promedio de 157,31 %. Este resultado evidencia un relieve extremadamente escarpado. Desde una perspectiva geométrica, una pendiente del 100 % equivale a un ángulo

aproximado de 45°; por tanto, valores superiores al 150 % corresponden a inclinaciones cercanas a 57°–58°, lo que configura un escenario morfodinámico de alta energía potencial gravitacional.

No solo se observa una diferencia numérica entre Villa Julia y Los Robles, sino que también hay un cambio significativo en la forma de comportarse hidrológicamente del terreno. En pendientes por encima del 150 %, el flujo superficial está dominado por el componente gravitacional, lo que disminuye de manera significativa el tiempo de residencia del agua en la tierra. Dentro de estas circunstancias, flujos concentrados con una notable capacidad para arrastrar pueden ser provocados incluso por lluvias de intensidad moderada. Asimismo, el flujo de escurrimiento se acelera de manera exponencial con el gradiente, lo cual facilita que las partículas finas y sus compuestos sean transportados.

La altitud registrada en Los Robles, cercana a 1841 m s. n. m., confirma que ambas veredas se encuentran en un rango altitudinal similar, por lo que las diferencias en el comportamiento geomorfológico no se explican por la altitud, sino por la inclinación y la configuración de la ladera. Esto indica que, en condiciones climáticas similares, la pendiente es el principal factor topográfico que determina la variación de la susceptibilidad entre predios.

La proximidad entre las áreas de cultivo y los drenajes naturales secundarios es un elemento importante en el análisis de georreferenciación. Cuando hay una pendiente empinada y la proximidad a cauces naturales, se genera un sistema con alta conectividad hidrológica. Esta conectividad permite que el flujo superficial del área alta de la ladera se incorpore rápidamente a la red de drenaje, lo cual disminuye el tiempo de atenuación natural del sistema. En términos de movilidad potencial, esta situación reduce la capacidad para retener espacio y aumenta la posibilidad de traspaso hacia cuerpos acuáticos aferentes.

El análisis comparativo entre las dos veredas muestra un gradiente de susceptibilidad topográfica. Durante eventos, Villa Julia tiene condiciones propicias para la escorrentía de alta intensidad, en tanto que Los Robles se distingue por una pendiente extrema, en la cual los procesos de infiltración son superados por la dinámica superficial.

Desde una perspectiva integradora, la topografía actúa como elemento articulador entre el clima y el suelo. Suelos con contenido de materia orgánica variable y humedad significativa, como los caracterizados previamente, pueden responder de manera distinta ante el mismo evento de lluvia según el gradiente de la ladera. En pendientes moderadas, parte del agua puede infiltrarse y distribuirse a lo largo del perfil; en pendientes extremas, el flujo superficial puede predominar incluso cuando el suelo presenta buena estructura.

Los hallazgos topográficos indican que la zona de estudio no tiene un relieve uniforme, sino un sistema de laderas con pendientes cambiantes y, en ciertas áreas, muy empinadas. La vereda Los Robles, que cuenta con valores de pendiente que aumentan considerablemente la energía potencial del sistema, crea un ambiente geomorfológico muy dinámico. Estas condiciones físicas son un elemento crucial para determinar el potencial de movilidad de los agroquímicos, porque tienen un impacto directo en la creación, la rapidez y la dirección de los flujos superficiales. La información topográfica que se ha reunido no muestra un impacto ambiental; sin embargo, sí establece un marco físico que aumenta la probabilidad de transporte lateral en situaciones de aplicación frecuente y con precipitaciones importantes.

4.3 FASE III. Determinar la movilidad de agroquímicos de mayor uso a través del software PIRI

4.3.1 Actividad 1. Revisión bibliográfica

Se realizó una revisión bibliográfica centrada en estudios científicos acerca de cómo los pesticidas se comportan en sistemas agrícolas para calcular la movilidad potencial de los agroquímicos utilizados en el cultivo del café en la zona de estudio. Esta revisión hizo más fácil la identificación de métodos que se emplean para evaluar el riesgo de transporte de estos compuestos en el suelo y su eventual llegada a fuentes hídricas, poniendo un énfasis particular en las áreas agrícolas localizadas en terrenos ladera.

La literatura científica señala que, tras su aplicación al suelo, los pesticidas experimentan diversos procesos ambientales, entre ellos la adsorción, la degradación, la lixiviación y la escorrentía superficial. La ocurrencia de estos procesos depende tanto de las propiedades fisicoquímicas del compuesto como de las características ambientales, tales

como la textura del suelo, la pendiente del terreno, la cobertura vegetal y las condiciones de precipitación[1]. En los sistemas agrícolas situados en regiones montañosas, estos factores adquieren una importancia aún mayor, dado que la pendiente facilita el escurrimiento superficial del agua, lo que incrementa el riesgo de transporte de residuos de pesticidas hacia áreas más bajas o hacia drenajes naturales.

En este contexto, diversos estudios han subrayado la importancia de emplear herramientas que permitan evaluar el riesgo ambiental asociado al uso de pesticidas antes de que estos compuestos generen impactos negativos en el medio ambiente. Entre estas herramientas se encuentra el Pesticide Impact Rating Index (PIRI), un modelo que estima el impacto ambiental de los pesticidas considerando variables como el tipo de suelo, el clima, la topografía y las propiedades químicas [10].

El modelo PIRI permite clasificar los pesticidas según su potencial de impacto ambiental en una escala que va desde Very low (muy bajo) hasta Extremely high (extremadamente alto), lo que facilita la comparación entre distintos compuestos utilizados en sistemas agrícolas. De esta manera, el modelo contribuye a identificar los productos que podrían presentar un mayor riesgo de transporte hacia aguas superficiales o subterráneas bajo determinadas condiciones de manejo [47].

Asimismo, los estudios más recientes señalan que utilizar modelos de evaluación de riesgo es una herramienta útil para mejorar la gestión medioambiental en sistemas agrícolas, porque fusiona datos de la agricultura y del medio ambiente con el fin de calcular cómo se comportan los pesticidas en situaciones específicas de producción[4]. Estos métodos son particularmente importantes en cultivos situados en terrenos inclinados, donde el transporte de contaminantes y la escorrentía superficial pueden ser favorecidos por la interacción entre factores climáticos y topográficos.

A partir de la información reunida en la revisión bibliográfica, se eligió el software PIRI como herramienta de análisis para este estudio porque puede integrar diferentes variables ambientales al evaluar el riesgo de movilidad de pesticidas. El uso de este software permitió incorporar los datos obtenidos en las etapas anteriores de la investigación, especialmente los relacionados con las características del suelo, el clima y la pendiente de las

fincas analizadas. Esto ayudó a estimar el potencial de movilidad de los agroquímicos más usados en el cultivo de café en la zona de estudio y brindó un respaldo técnico claro para interpretar los resultados de esta etapa.[13]

4.3.2 Procesamiento de información en el software PIRI

La utilización del modelo Pesticide Impact Rating Index (PIRI) permitió estimar el potencial de movilidad de los agroquímicos identificados en las fincas evaluadas, considerando su comportamiento durante los procesos de transporte hacia fuentes hídricas. Los resultados muestran variaciones significativas entre compuestos y predios, lo que indica la influencia combinada de las propiedades fisicoquímicas de los ingredientes activos y de las condiciones ambientales del área de estudio [48].

En las fincas de la vereda Villa Julia, los compuestos evaluados presentan comportamientos de riesgo diferenciados. En VJ1, el propiconazol, el glifosato y el paraquat se clasifican en la categoría de riesgo medio, mientras que la bifentrina se clasifica en la categoría de riesgo bajo (ver Figura 16). En VJ2, el glifosato alcanza un nivel de riesgo alto, en contraste con la abamectina, que se sitúa en un nivel medio, y el mancozeb, que presenta un riesgo bajo (ver Figura 17). En VJ3, se observa una tendencia similar: el glifosato y la abamectina se ubican en un nivel medio, mientras que la bifentrina mantiene un riesgo bajo (ver Figura 18). En VJ4, se identifican valores más elevados, ya que el benomilo, el glifosato y el paraquat alcanzan categorías de riesgo alto, mientras que el mancozeb permanece en niveles bajos (ver Figura 19).

Figura 16.

Resultado PIRI VJ1

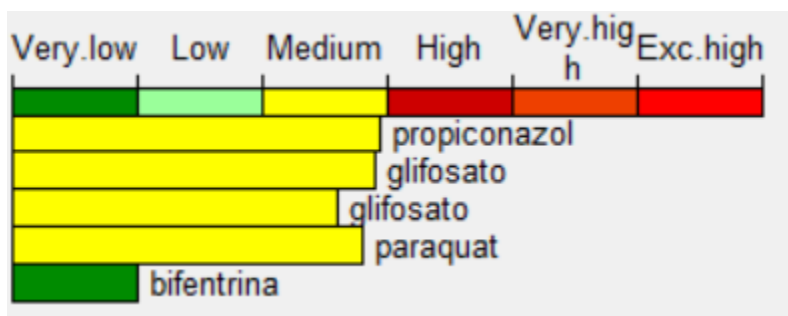
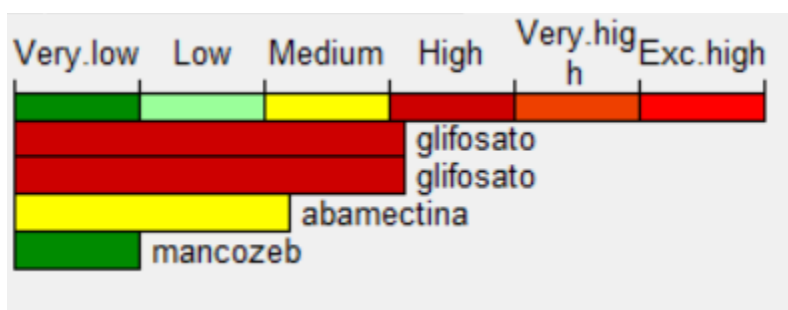
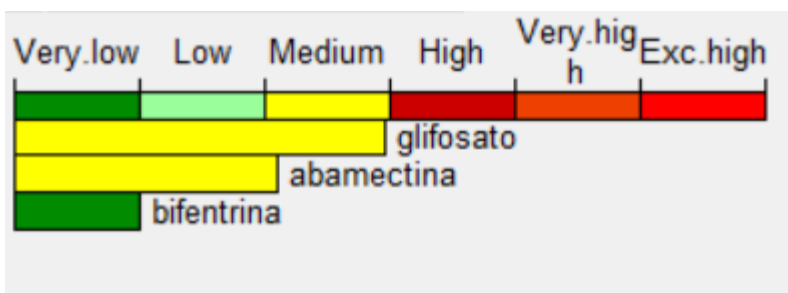
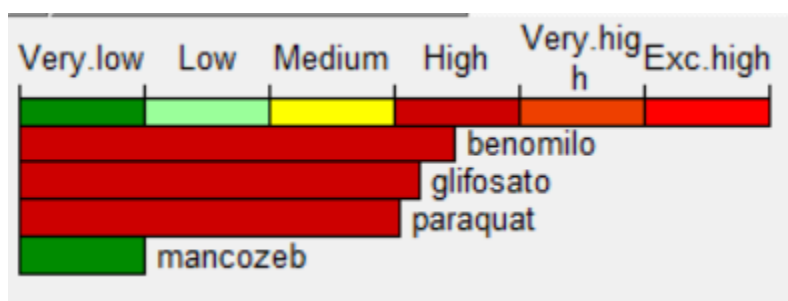


Figura 17.*Resultado PIRI VJ2***Figura 18.***Resultado PIRI VJ3***Figura 19.***Resultado PIRI VJ4*

En las fincas de la vereda Los Robles, los resultados indican una tendencia general hacia niveles elevados de riesgo. En LR1, tanto el glifosato como el propiconazol se clasifican en la categoría de riesgo alto (ver Figura 20). De manera similar, en LR2 y LR3, el benomilo y el glifosato presentan niveles de riesgo alto, mientras que la bifentrina

permanece en niveles bajos (ver Figura 21), (ver Figura 22). En LR4, el benomilo mantiene un comportamiento de alto riesgo, el glifosato se sitúa en un nivel medio y la bifentrina conserva un nivel bajo (ver Figura 23).

Figura 20.

Resultado PIRI LR1

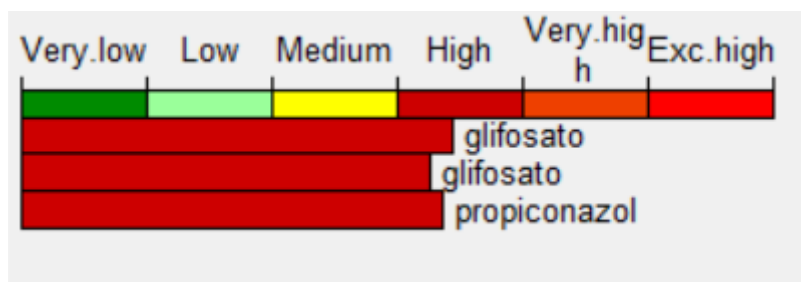


Figura 21.

Resultado PIRI LR2

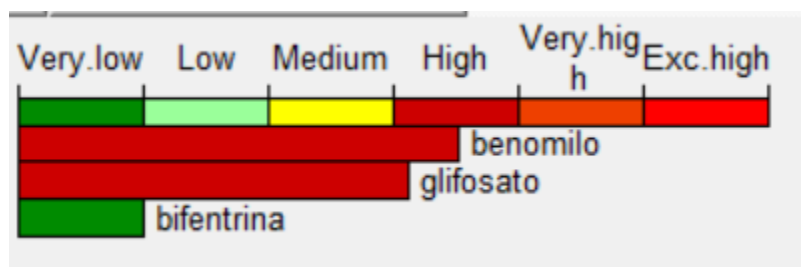


Figura 22.

Resultado PIRI LR3

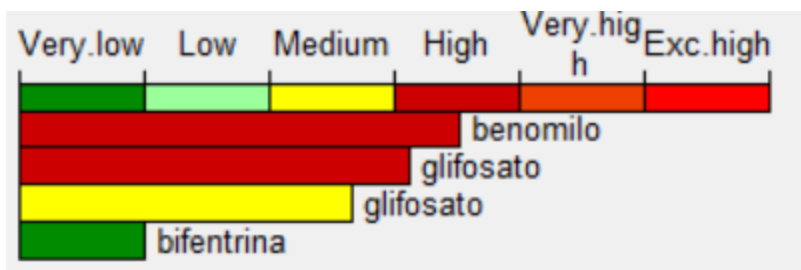
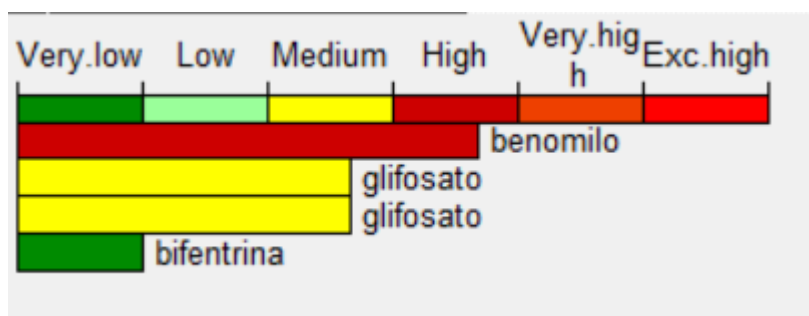


Figura 23.*Resultado PIRI LR4*

En general, los resultados indican que compuestos como el glifosato, el benomilo, el paraquat y el propiconazol presentan los niveles más altos de riesgo de movilidad en el área de estudio, alcanzando categorías medias y altas en varias fincas evaluadas. En contraste, sustancias como la bifentrina y el mancozeb se clasifican predominantemente en categorías bajas, lo que sugiere una probabilidad reducida de transporte hacia fuentes hídricas bajo las condiciones analizadas [16].

Este comportamiento se asocia a las propiedades fisicoquímicas de los compuestos, como su solubilidad, persistencia y afinidad por las partículas del suelo, factores que determinan su capacidad de movilización en el ambiente. Específicamente, los compuestos con mayor movilidad resultan más susceptibles a procesos de transporte por escorrentía superficial o lixiviación, especialmente bajo condiciones como las identificadas en el área de estudio, caracterizadas por pendientes pronunciadas y eventos de precipitación.

Adicionalmente, los resultados del modelo PIRI muestran una relación directa con las condiciones edafológicas previamente caracterizadas. La combinación de suelos con contenidos variables de humedad y materia orgánica, junto con un pH ácido relativamente homogéneo, influye en la dinámica de adsorción y transporte de los agroquímicos. Por lo tanto, las fincas con mayores contenidos de humedad y ubicadas en zonas de mayor pendiente presentan un escenario más propicio para el transporte de compuestos hacia fuentes hídricas, lo que coincide con los niveles de riesgo observados.

4.3.3 Diseño de cartilla

En la etapa final del estudio, se elaboró una cartilla para caficultores de Sotará, destinada a divulgar los resultados y fomentar el uso responsable de agroquímicos mediante recomendaciones que reduzcan el riesgo de contaminación hídrica.

La cartilla emplea un lenguaje claro y accesible, e integra ilustraciones junto con recomendaciones prácticas orientadas a los agricultores. El contenido aborda el uso de agroquímicos en el cultivo de café, la importancia de su manejo responsable, los factores que afectan su movilidad ambiental y una serie de buenas prácticas agrícolas relacionadas con la conservación del suelo, el manejo en terrenos inclinados, la protección de fuentes hídricas y la disposición adecuada de los envases.

Adicionalmente, el material presenta recomendaciones dirigidas a los caficultores para promover prácticas agrícolas que contribuyan a la conservación del suelo y del agua en las fincas cafeteras. De esta manera, la cartilla funciona como una herramienta de transferencia de conocimiento que permite trasladar los resultados de la investigación al contexto productivo local.

El documento completo de la cartilla se presenta como anexo en formato digital (PDF) Dentro del presente trabajo de investigación. Posteriormente, se contempla la impresión del material para su entrega a los agricultores de las veredas Villa Julia y Los Robles, con el objetivo de fortalecer los procesos de sensibilización sobre el uso adecuado de agroquímicos y la protección de las fuentes hídricas en el municipio de Sotará.

Capítulo 5. Conclusiones y recomendaciones

5.1 Conclusiones

La investigación permitió estimar el potencial de movilidad de agroquímicos utilizados en sistemas productivos cafeteros del municipio de Sotará, integrando información sobre las prácticas de manejo del cultivo, las características ambientales del área de estudio y la aplicación del modelo Pesticide Impact Rating Index PIRI. Este enfoque permitió comprender la interacción entre los ingredientes activos empleados en las fincas evaluadas y las condiciones físicas del territorio donde se desarrollan las actividades agrícolas.

El diagnóstico realizado en las veredas Villa Julia y Los Robles evidenció el uso de diversos agroquímicos destinados al control de malezas, plagas y enfermedades del cultivo de café. La identificación de estos ingredientes activos permitió identificar los compuestos presentes en el sistema productivo y establecer la base de información necesaria para evaluar su comportamiento potencial en el ambiente.

La caracterización de las condiciones edafológicas del área de estudio evidenció la presencia de suelos con pH ácido, humedad variable y niveles importantes de materia orgánica. Estas características influyen en la interacción entre el suelo y los agroquímicos, ya que factores como la acidez y la presencia de materia orgánica pueden afectar procesos de adsorción, degradación y movilidad de los compuestos químicos aplicados en el cultivo.

Los resultados obtenidos mediante el modelo PIRI permitieron identificar diferencias en el potencial de movilidad de los ingredientes activos evaluados. Estos hallazgos demuestran que ciertos compuestos presentan una mayor susceptibilidad a desplazarse hacia fuentes de agua bajo las condiciones ambientales de las fincas analizadas. Este comportamiento se relaciona tanto con las propiedades fisicoquímicas de los agroquímicos como con factores ambientales, entre los que destacan la pendiente del terreno, la dinámica de las precipitaciones y las características del suelo.

Los resultados de la investigación subrayan la importancia de tener en cuenta las condiciones ambientales del territorio al aplicar agroquímicos en sistemas de producción cafetera. La interacción entre las prácticas agrícolas y las características del paisaje determina el comportamiento de estos compuestos en el entorno lo que resalta la necesidad de promover

prácticas de manejo que contribuyan a reducir el riesgo de desplazamiento hacia las fuentes de agua.

En conclusión, la elaboración de una cartilla informativa dirigida a caficultores facilitó la traducción de los resultados de la investigación en recomendaciones prácticas para la gestión responsable de productos químicos agrícolas. Este documento es un aporte importante para la divulgación de buenas prácticas agrícolas en la región y fortalece los procesos de concienciación acerca de la protección del suelo y de las fuentes hídricas en las áreas cafeteras. del municipio de Sotará

5.2 Recomendaciones

A partir de los resultados obtenidos en esta investigación, se proponen recomendaciones orientadas a optimizar el manejo de agroquímicos y a fortalecer la protección de los recursos naturales en las zonas cafeteras del municipio de Sotará.

En primer lugar, se recomienda implementar programas de capacitación dirigidos a los caficultores sobre el uso responsable de agroquímicos, enfatizando la evaluación de las características del terreno, las condiciones climáticas y la proximidad a fuentes hídricas antes de cada aplicación. Estas medidas favorecerán la mejora de las prácticas agrícolas y disminuirán el riesgo de dispersión de compuestos químicos en el entorno.

Asimismo, resulta esencial consolidar la adopción de buenas prácticas agrícolas enfocadas en la conservación del suelo y la protección de fuentes hídricas, particularmente en fincas ubicadas en terrenos inclinados. La aplicación de estrategias como la creación de franjas de protección vegetal, el mantenimiento de la cobertura del suelo y la planificación precisa de las aplicaciones contribuirá a reducir la escorrentía y el transporte de agroquímicos.

De igual forma, se sugiere que las instituciones locales y las organizaciones del sector cafetero continúen implementando estrategias de acompañamiento técnico para los productores, con el propósito de promover prácticas agrícolas sostenibles que integren la productividad del cultivo con la conservación de los recursos naturales.

Finalmente, se recomienda que investigaciones futuras amplíen el análisis realizado en este estudio mediante la inclusión de variables ambientales adicionales y la evaluación de un mayor número de fincas o zonas productivas. Esta ampliación permitirá profundizar en la comprensión del comportamiento de los agroquímicos en distintos contextos agrícolas y generar información relevante para la toma de decisiones en la gestión ambiental del territorio.

Referencias

- [1] M. Arias Estévez, E. López Periago, E. Martínez Carballo, J. Simal Gándara, J.-C. Mejuto, y L. García Río, «The mobility and degradation of pesticides in soils and the pollution of groundwater resources», *Agriculture, Ecosystems & Environment*, vol. 123, n.º 4, pp. 247-260, feb. 2008, doi: 10.1016/j.agee.2007.07.011.
- [2] H. Tevez y M. Dos Santos Afonso, «Degradación y Movilidad de los Agroquímicos en Suelos y Aguas Naturales. Casos de Estudio en Argentina.», en *Química y Civilización*, L. Galagovsky, Ed., Buenos Aires: Asociación Química Argentina, pp. 275-284. Accedido: 21 de febrero de 2026. [En línea]. Disponible en: https://www.researchgate.net/publication/260080493_Degradacion_y_Movilidad_de_lo_s_Agroquimicos_en_Suelos_y_Aguas_Naturales_Casos_de_Estudio_en_Argentina
- [3] O. M. B. Vargas, D. F. H. Forero, y K. A. P. Haiek, «INFORME ANUAL DE GESTIÓN».
- [4] K. Lewis, J. Tzilivakis, D. Warner, y A. Green, «An international database for pesticide risk assessments and management», *Human and Ecological Risk Assessment: An International Journal*, vol. 22, n.º 4, pp. 1050-1064, may 2016, doi: 10.1080/10807039.2015.1133242.
- [5] V. T. de Queiroz *et al.*, «Environmental risk assessment for sustainable pesticide use in coffee production», *Journal of Contaminant Hydrology*, vol. 219, pp. 18-27, dic. 2018, doi: 10.1016/j.jconhyd.2018.08.008.
- [6] R. S. Kookana, R. L. Correll, y R. B. Miller, «Pesticide Impact Rating Index – A Pesticide Risk Indicator for Water Quality», *Water Air Soil Pollut: Focus*, vol. 5, n.º 1, pp. 45-65, ago. 2005, doi: 10.1007/s11267-005-7397-7.
- [7] J. Baffes y W. Chian Koh, «Proporción de las exportaciones mundiales de Belarús, Ucrania y Rusia». Accedido: 21 de febrero de 2026. [En línea]. Disponible en: <https://datawrapper.dwcdn.net/fK7sw/1/>
- [8] Y. Fernández-Cortés, K. D. Sotto-Rodríguez, L. A. Vargas-Marín, Y. Fernández-Cortés, K. D. Sotto-Rodríguez, y L. A. Vargas-Marín, «Impactos ambientales de la producción del café, y el aprovechamiento sustentable de los residuos generados», *Producción + Limpia*, vol. 15, n.º 1, pp. 93-110, jun. 2020, doi: 10.22507/pml.v15n1a7.

- [9] M. F. Sierra, B. C. Polania, y J. F. Giraldo, «Estrategia sostenible biotecnológica para disminuir los Agroquímicos en la producción del café en la vereda la Mercedes del pital huila», *Ciencia Latina Revista Científica Multidisciplinar*, vol. 7, n.º 2, pp. 6766-6793, may 2023, doi: 10.37811/cl_rcm.v7i2.5823.
- [10] P. Aguilar Mora, «Uso del “Pesticide Impact Rating Index” (PIRI) para estimar la peligrosidad del uso de plaguicidas en el cultivo de cebolla (*Allium cepa* L.)», *O Mundo Da Saúde*, vol. 38, n.º 1, pp. 24-30, 2014, doi: <https://doi.org/10.15343/0104-7809.20143801024030>.
- [11] J. A. Martinez Bolaños, V. A. Salazar Ceron, y K. M. Salazar Guerrero, «Plan de Desarrollo Agropecuario Sotará», Scribd. Accedido: 19 de marzo de 2026. [En línea]. Disponible en: <https://es.scribd.com/document/865208504/PLAN-GENERAL-DE-ASISTENCIA-TE-CNICA-MUNICIPIO-DE-SOTARA-2024-2027>
- [12] W. A. Guardado Mejia, «Presencia de agroquímicos persistentes en tres microcuencas abastecedoras de agua en el Oriente de Honduras», Zamorano: Escuela Agrícola Panamericana, 2019., 2019. Accedido: 21 de marzo de 2026. [En línea]. Disponible en: <https://bdigital.zamorano.edu/handle/11036/6580>
- [13] W. Chen, P. Hertl, S. Chen, y D. Tierney, «A pesticide surface water mobility index and its relationship with concentrations in agricultural drainage watersheds», *Environ Toxicol Chem*, vol. 21, n.º 2, pp. 298-308, feb. 2002, doi: 10.1897/1551-5028(2002)021<0298:apswmi>2.0.co;2.
- [14] D. I. Gustafson, «Groundwater ubiquity score: A simple method for assessing pesticide leachability», *Environmental Toxicology and Chemistry*, vol. 8, n.º 4, pp. 339-357, 1989, doi: 10.1002/etc.5620080411.
- [15] F. L. Alfonso y I. T. Toro Suarez, «Riesgo Ambiental por el uso de Agroquímicos», *INVENTUM*, vol. 5, n.º 9, pp. 32-41, jul. 2010, doi: 10.26620/uniminuto.inventum.5.9.2010.32-41.
- [16] L. L. Foloni, E. D. Velini, C. A. Carbonari, J. D. Rodrigues, E. O. Ono, y R. A. la Cruz, «Glyphosate residues in coffee bean: Impact of application methods and compliance with MRLs», *Adv. Weed Sci.*, vol. 42, p. e020240060, 2024, doi: <https://doi.org/10.51694/AdvWeedSci/2024;42:00006>.

- [17] R. F. Carsel, L. A. Mulkey, M. N. Lorber, y L. B. Baskin, «The Pesticide Root Zone Model (PRZM): A procedure for evaluating pesticide leaching threats to groundwater», *Ecological Modelling*, vol. 30, n.º 1-2, pp. 49-69, oct. 1985, doi: 10.1016/0304-3800(85)90036-5.
- [18] M. I. Castro Londoño, «El cultivo del café en Colombia, sus plagas, y sus mecanismos de control», Trabajo de grado pregrado, Universidad del Quindío, Armenia, 2010. [En línea]. Disponible en: <https://bdigital.uniquindio.edu.co/server/api/core/bitstreams/0e0d481f-0055-4204-98b3-e10ab7dcd806/content>
- [19] None, *Evaluation of pesticides in ground water : developed from a symposium sponsored by the Division of Pesticide Chemistry at the 189th Meeting of the American Chemical Society, Miami Beach, Florida, April 28-May 3, 1985*. Washington, D.C. : American Chemical Society, 1986. Accedido: 21 de febrero de 2026. [En línea]. Disponible en: <http://archive.org/details/evaluationofpest0000unse>
- [20] «Justia Colombia :: Constitución Política De Colombia > TÍTULO II > CAPÍTULO 3 :: Ley de Colombia». Accedido: 21 de febrero de 2026. [En línea]. Disponible en: <https://colombia.justia.com/nacionales/constitucion-politica-de-colombia/titulo-ii/capitulo-3/>
- [21] «DECRETO 1843 DE 1991». Accedido: 21 de febrero de 2026. [En línea]. Disponible en: <https://www.suin-juriscol.gov.co/viewDocument.asp?ruta=Decretos/1359845>
- [22] «Decreto 4741 de 2005 - Gestor Normativo». Accedido: 21 de febrero de 2026. [En línea]. Disponible en: <https://www.funcionpublica.gov.co/eva/gestornormativo/norma.php?i=18718>
- [23] E. M. Pinedo Taboada, «El uso de plaguicidas químicos en el cultivo de café (Coffea arabica) su relación con el medio ambiente y la salud” en los caseríos de Julio Cesar Tello, Alto Cuchara y los Ángeles Km7 Leoncio Prado», 2021, Accedido: 21 de febrero de 2026. [En línea]. Disponible en: <https://hdl.handle.net/20.500.14292/2563>
- [24] I. M. Gelvez Pardo, J. M. Moreno Rodríguez, y A. M. Santos Diaz, *Guía de muestreo de suelo para análisis microbiológico*. Corporación colombiana de investigación agropecuaria - AGROSAVIA, 2020. doi: 10.21930/agrosavia.nbook.7404098.

- [25] M. Luzuriaga Amador, N. Novillo Luzuriaga, F. Guevara Viejo, y J. D. Valenzuela Cobos, «Evaluation of the Performance of Information Competencies in the Fertilization and Trade Strategies of Small Banana Producers in Ecuador», *Sustainability*, vol. 17, n.º 3, ene. 2025, doi: 10.3390/su17030868.
- [26] I. S. Burgos Villamar y L. E. Solis Granda, «Analysis of the Impact of Information Behavior on the Marketing and Fertilization Strategies of Small Cocoa Producers in the Provinces of Guayas and Los Ríos in Ecuador», *Agriculture*, vol. 15, n.º 8, abr. 2025, doi: 10.3390/agriculture15080858.
- [27] A. Rebolledo Roa, D. Y. Dorado Guerra, L. C. Grajales Guzmán, A. M. Trejos Arana, y A. K. Rodríguez León, *Criterios para la definición de planes de fertilización y la aplicación de riego en cultivos de aguacate Hass con un enfoque tecnificado*. Corporación colombiana de investigación agropecuaria - AGROSAVIA, 2023. doi: 10.21930/agrosavia.analisis.7406801.
- [28] V. Paneque Pérez, J. Calaña Naranajo, M. Calderon Valdes, Y. Borges Benites, T. Hernandez Garcia, y M. Caruncho Contreras, «Manual de técnicas analíticas para análisis de suelo, foliar, abonos orgánicos y fertilizantes químicos», 2010, Accedido: 23 de marzo de 2026. [En línea]. Disponible en: <https://www.semanticscholar.org/paper/Manual-de-t%C3%A9cnicas-anal%C3%ADticas-para-an%C3%A1lisis-de-y-Paneque-P%C3%A9rez/a0255840ec7a05b9386483908176c71b884f573c>
- [29] W. Lockeretz, «Calidad del suelo y del agua: Una agenda para la agricultura», *Consejo Nacional de Investigación, Junta de Agricultura, Comité de Políticas de Conservación del Suelo y el Agua a Largo Plazo*, pp. 28-31, 08062010.
- [30] G. E. Poc Alvarez, «Medición de Pendiente en Terreno Agrícola», Scribd. Accedido: 19 de marzo de 2026. [En línea]. Disponible en: <https://es.scribd.com/document/557421477/INFORME-DE-EDAFOLOGIA>
- [31] H. Rivera Posada y Gomez Aristizabal, «Erosion potencial de los suelos de la zona cafetera central colombiana», *Biblioteca banco de la republica*, vol. 44, n.º 4, Cenicafe, Chinchina, pp. 141-154, 12 de diciembre de 1983.
- [32] CSIRO, «Pesticide Impact Rating Index (PIRI) software». Accedido: 21 de marzo de 2026. [En línea]. Disponible en: <https://www.csiro.au/en/research/plants/Pathogens-Pests-Weeds/PIRI>

- [33] A. Mojica y J. Guerrero, «Evaluación del movimiento de plaguicidas hacia la cuenca del lago de tota, Colombia», *Revista Colombiana de Química*, vol. 42, n.º 2, pp. 29-38, 2013.
- [34] M. J. Dalpiaz y A. Andriulo, «Comparación de índices de riesgo de lixiviación de plaguicidas», *Ciencia del suelo*, vol. 35, n.º 2, pp. 365-376, dic. 2017.
- [35] L. Salazar Gutiérrez, É. Hincapié, H. D. Menza, y F. A. Torres, «Manejo de arvenses en los sistemas de producción de café.», en *Manejo Agronómico de los Sistemas de Producción de Café*, Centro Nacional de Investigaciones de Café, Ed., Cenicafé, 2020, pp. 150-196. doi: 10.38141/10791/0002_5.
- [36] P. Buriticá Céspedes, «La roya del cafeto en Colombia: Realizaciones de impacto nacional e internacional en el siglo xx», *Revista Facultad Nacional de Agronomía: Medellín*, vol. 63, n.º 1, pp. 5285-5292, 2010.
- [37] L. F. A. López, J. M. Mora, A. V. Pinzón, L. F. S. Gartner, R. V. Pardo, y F. G. Harders, «La roya del cafeto en Colombia, Impacto, manejo y costos del control», 2011, [En línea]. Disponible en: https://federaciondecafeteros.org/static/files/roya/boletin_roya/BoletinRoya1Definitivo.pdf
- [38] F. Grajales C, S. M. García A, y M. E. Bernal V, «Efecto de la aplicación de glifosato en la flora y microflora asociada a arvenses en el cultivo de café (*Coffea arabica* L) en el municipio de Santa Rosa de Cabal, Departamento de Risaralda», *Cultura y droga*, vol. 8, n.º 10, pp. 225-254, 2003.
- [39] E. González Ortega, M. H. Fuentes Ponce, E. González Ortega, y M. H. Fuentes Ponce, «Dinámica del glifosato en el suelo y sus efectos en la microbiota», *Revista internacional de contaminación ambiental*, vol. 38, 2022, doi: 10.20937/rica.54197.
- [40] FAO, «Código Internacional de Conducta sobre la Gestión de Plaguicidas | Gestión de Plagas y Plaguicidas | Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura | Gestión Integrada de Plagas y Reducción del Riesgo de Plaguicidas | Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura». Accedido: 21 de marzo de 2026. [En línea]. Disponible en: <https://www.fao.org/pest-and-pesticide-management/pesticide-risk-reduction/code-conduct/en/>

- [41] Unidad de Seguridad Química y Salud, «Recommended Classification of Pesticides by Hazard and guidelines to classification, 2019 edition». Accedido: 21 de marzo de 2026. [En línea]. Disponible en: <https://www.who.int/publications/i/item/9789240005662>
- [42] G. Cruz Ceron, J. F. Trejos Pinzon, C. A. Serna Giralso, y P. A. Calderon Cuartas, «Evaluación de ingredientes activos de plaguicidas aplicados en sistemas de producción cafeteros certificados y no certificados en cundinamarca y santander», vol. 62, n.º 1, Cenicafé, pp. 17-31, 2011.
- [43] A. T. Torrente y Á. L. Ladino, «Caracterización de propiedades fisicoquímicas de los suelos de la zona Cafetera del municipio de Isnos con el fin de establecer su aptitud de uso y manejo», *Ingeniería y Región*, vol. 6, n.º 1, pp. 77-82, dic. 2009, doi: 10.25054/22161325.814.
- [44] W. Jan Van, «Captación y almacenamiento de agua de lluvia», 2013. [En línea]. Disponible en: <https://www.fao.org/4/i3247s/i3247s.pdf>
- [45] S. Sadeghian Khalajabadi, «La materia orgánica en agroecosistemas cafeteros de Colombia», en *Materia orgánica biología del suelo y productividad agrícola: Segundo seminario regional comité regional eje cafetero*, Sociedad Colombiana de la Ciencia del Suelos y Centro Nacional de Investigaciones de Café, Eds., Cenicafé, 2009, pp. 72-99. doi: 10.38141/10791/0003_4.
- [46] «CLIMA - IDEAM». Accedido: 12 de marzo de 2026. [En línea]. Disponible en: <http://archivo.ideam.gov.co/web/tiempo-y-clima/clima>
- [47] V. Carreño, «El uso de agroquímicos y el daño a la salud en Colombia». Accedido: 21 de febrero de 2026. [En línea]. Disponible en: <https://medioambiente.uexternado.edu.co/el-uso-de-agroquimicos-y-el-dano-a-la-salud-en-colombia/>
- [48] A. Merhi, R. Kordahi, y H. F. Hassan, «A review on the pesticides in coffee: Usage, health effects, detection, and mitigation», *Front Public Health*, vol. 10, p. 1004570, nov. 2022, doi: 10.3389/fpubh.2022.1004570.

Anexos

Anexo 1. Encuesta

NOMBRES Y APELLIDOS:

PROPIETARIO ____ ARRENDATARIO ____

HECTÁREAS TOTALES DEL PREDIO: ____

HECTÁREAS CULTIVADAS DE CAFÉ: ____

VARIEDAD DE CAFÉ: ____

PREGUNTAS	MARCAR CON UNA X
¿En su predio se han realizado análisis de agua?	SI ____ NO ____
¿En su predio se han realizado análisis de suelo?	SI ____ NO ____
¿Han recibido capacitación en el manejo integrado de plagas?	SI ____ NO ____
¿Lleva registros del café producido en la finca? Si su respuesta es SÍ, indique la periodicidad.	SI ____ NO ____ Periodicidad: <u>EN COSECHA</u>
¿Ha recibido capacitaciones sobre el uso y manejo seguros de los agroquímicos?	SI ____ NO ____
¿Ha recibido capacitaciones sobre el uso de los equipos de protección?	SI ____ NO ____
¿Qué tipo de agroquímico utiliza en su cultivo?	Herbicidas, fertilizantes, insecticidas, abono orgánico
¿Cuál de estos agroquímicos utiliza en su cultivo?	Fertilizantes ____ Herbicidas ____ Pesticidas ____ Fungicidas ____
¿Con qué frecuencia aplica agroquímicos en su cultivo?	Mensualmente ____ Cada dos meses ____ Cada seis meses ____ Anual ____

¿De dónde proviene el agua que utiliza para el riego de sus cultivos?	Ríos o quebradas ____ Pozos ____ Acueducto ____ Otro: _____
¿Utiliza equipo de protección al aplicar agroquímicos? Si su respuesta es SÍ, mencione de qué está compuesto su equipo de protección.	SI ____ NO ____ Equipos de protección: 1. Botas 2. 3. 4. 5.
¿Usa el equipo adecuado para medir agroquímicos y fertilizantes? Si su respuesta es SÍ, ¿cuáles?	SI ____ NO ____ ¿Cuales? _____
¿Tiene los materiales adecuados para contener derrames de agroquímicos? Si su respuesta es SÍ, ¿cuáles?	SI ____ NO ____ ¿Cuál?
¿Cómo hace usted el almacenamiento de los agroquímicos?	

Anexo 2. Cartilla digital (PDF)